

Trabajo de Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Influencia de las pérdidas en la red de transporte en
el rendimiento de los sistemas de energía solar

Autor: Lucía Marín Martínez

Tutor: José Guerra Macho

Departamento de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Trabajo de Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Influencia de las pérdidas en la red de transporte en el rendimiento de los sistemas de energía solar

Autor:
Lucía Marín Martínez

Tutor:
José Guerra Macho
Catedrático de Universidad

Departamento de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2016

Trabajo Fin de Grado: Influencia de las pérdidas en la red de transporte en el rendimiento de los sistemas de energía solar

Autor: Lucía Marín Martínez

Tutor: José Guerra Macho

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

A mi familia
A mis incondicionales

Resumen

En los últimos años, el consumo de energía solar térmica ha experimentado un aumento aportando importantes beneficios económicos y medioambientales. España también ha seguido esta tendencia convirtiéndose en el segundo mercado europeo más importante en este tipo de energía.

La finalidad de este proyecto así como su motivación es el estudio de la influencia de diversos parámetros en el rendimiento de los sistemas de energía solar. Entre éstos se encuentran las pérdidas en la red de distribución.

El proyecto consiste en un análisis comparativo de los métodos de simulación f-Chart, CHEQ4 y TRNSYS que han sido aplicados a un sistema solar térmico para la producción de ACS en instalaciones de consumo múltiple con todo centralizado. Se han simulado 72 casos donde se variaron la ubicación, el área de captación y la longitud de la red de distribución. En el documento se incluyen gráficas y tablas que muestran los resultados y conclusiones obtenidos de dichas simulaciones.

ÍNDICE

| | |
|---|------------|
| Resumen | vi |
| ÍNDICE | vii |
| Índice de Tablas | ix |
| Índice de Figuras | x |
| Notación | xii |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. <i>Objetivo del proyecto</i> | 1 |
| 1.2. <i>Energía solar térmica a baja temperatura</i> | 1 |
| 1.2.1 Estado actual del consumo energético en España | 1 |
| 1.2.2 Estado actual de la energía solar térmica en España | 3 |
| 1.3. <i>Organización y contenido del proyecto</i> | 4 |
| 2. Instalaciones de energía solar para producción de acs | 6 |
| 2.1. <i>Introducción</i> | 6 |
| 2.2. <i>Instalaciones de energía solar para producción de ACS</i> | 6 |
| 2.3. <i>Clasificación de instalaciones</i> | 7 |
| 2.3.1 Principio de circulación | 7 |
| 2.3.2 Sistema de transferencia de calor | 9 |
| 2.3.3 Sistema de expansión | 10 |
| 2.3.4 Sistema de energía auxiliar | 11 |
| 2.3.5 Aplicación | 11 |
| 2.4. <i>Equipos y componentes de la instalación</i> | 12 |
| 2.4.1 Captador solar | 12 |
| 2.4.2 Sistema de acumulación | 24 |
| 2.4.3 Sistema de intercambio | 25 |
| 2.4.4 Circuito hidráulico | 26 |
| 3. Métodos de cálculo | 32 |
| 3.1. <i>Introducción</i> | 32 |
| 3.2. <i>Métodos en base horaria. TRNSYS.</i> | 32 |
| 3.2.1 Aproximación en el modelado de componentes | 34 |
| 3.2.2 Componentes de la librería estándar de TRNSYS | 34 |
| 3.2.3 Creación de sistemas complejos | 38 |
| 3.2.4 Escalas de tiempo contempladas | 39 |
| 3.2.5 El motor de cálculo de TRNSYS | 39 |
| 3.2.6 Aplicaciones de TRNSYS | 40 |
| 3.3. <i>Método f-Chart</i> | 41 |
| 3.3.1 Introducción | 41 |
| 3.3.2 Alcance del método | 42 |
| 3.3.3 Desarrollo del método | 43 |
| 3.4. <i>Método Metasol (CHEQ4)</i> | 48 |
| 3.4.1 Metodología de cálculo | 48 |
| 3.4.2 Entradas al programa | 49 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.4.3. | Cálculo de pérdidas en CHEQ4 | 60 |
| 4. | Estudio de casos | 61 |
| 4.1. | <i>Introducción</i> | 61 |
| 4.2. | <i>Descripción de casos</i> | 61 |
| 4.3. | <i>Estudio del caso de referencia.</i> | 64 |
| 4.4. | <i>Análisis de sensibilidad</i> | 69 |
| 5. | Resumen y conclusiones | 75 |
| | Bibliografía | 77 |
| | ANEXO. Resultados | 78 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 3.1: Controladores de TRNSYS. | 35 |
| Tabla 3.2: Componentes eléctricos de TRNSYS. | 35 |
| Tabla 3.3: Componentes intercambiadores de TRNSYS. | 35 |
| Tabla 3.4: Componentes calentamiento y enfriamiento auxiliar de TRNSYS. | 36 |
| Tabla 3.5: Componentes sistemas de hidrógeno de TRNSYS. | 36 |
| Tabla 3.6: Componentes hidráulicos de TRNSYS. | 36 |
| Tabla 3.7: Componentes cálculo de cargas en edificios de TRNSYS. | 36 |
| Tabla 3.8: Componentes fenómenos físicos de TRNSYS. | 37 |
| Tabla 3.9: Componentes sistemas de energía solar de TRNSYS. | 37 |
| Tabla 3.10: Componentes sistemas de almacenamiento térmico de TRNSYS. | 37 |
| Tabla 3.11: Componentes utilidades de TRNSYS. | 38 |
| Tabla 3.12: Componentes lectura y procesamiento de datos. | 38 |
| Tabla 4.1: Datos meteorológicos. | 62 |
| Tabla 4.2: Datos de ensayo del captador solar. | 63 |
| Tabla 4.3: Resultados caso de referencia. | 69 |
| Tabla 4.4: Influencia de la localidad. | 71 |
| Tabla 4.5: Influencia de las pérdidas en distribución. | 71 |
| Tabla 4.6: Errores relativos promedio. | 73 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1: Evolución del consumo de energía final en España por fuentes (1990-2012). | 2 |
| Figura 1.2: Estructura de consumo según usos energéticos en el sector doméstico. | 3 |
| Figura 1.3: Evolución de la energía solar térmica en España. | 4 |
| Figura 2.1: Esquema general de funcionamiento. | 7 |
| Figura 2.2: Instalación por termosifón. | 8 |
| Figura 2.3: instalación por circulación forzada. | 9 |
| Figura 2.4: Sistema de energía auxiliar en el acumulador solar. | 11 |
| Figura 2.5: Esquema de captadores en serie. | 17 |
| Figura 2.6: Influencia en el rendimiento del número de captadores en serie. | 20 |
| Figura 2.7: Distribución de temperatura a través de los captadores. | 21 |
| Figura 2.8: Esquema de instalación con intercambiador de calor | 23 |
| Figura 3.1: Esquema de concepto de modelo en TRNSYS. | 34 |
| Figura 3.2: Esquema estándar de sistema solar térmico para el calentamiento de agua. | 42 |
| Figura 3.3: Curvas f para sistemas de líquidos. | 46 |
| Figura 3.4: Factor de corrección por almacenamiento. | 47 |
| Figura 3.5: Pantalla de CHEQ4 localización. | 49 |
| Figura 3.6: Pantalla de CHEQ4 configuración. | 50 |
| Figura 3.7: Instalación para consumo único con sistema prefabricado. | 51 |
| Figura 3.8: Instalación para consumo único con interacumulador. | 51 |
| Figura 3.9: Instalación para consumo único con intercambiador independiente. | 52 |
| Figura 3.10: Instalación para consumo único con intercambiador independiente. | 52 |
| Figura 3.11: Instalación para consumo múltiple con todo centralizado. | 53 |
| Figura 3.12: Instalación para consumo múltiple con acumulación centralizada y apoyo distribuido. | 53 |
| Figura 3.13: Instalación para consumo múltiple con acumulación distribuida. | 54 |
| Figura 3.14: Instalación para consumo múltiple con intercambio distribuido. | 54 |
| Figura 3.15: Pantalla de CHEQ4 demanda. | 55 |
| Figura 3.16: Pantalla de CHEQ4 solar/apoyo. | 56 |
| Figura 3.17: Pantalla de CHEQ4 otros parámetros | 58 |
| Figura 3.18: Pantalla de CHEQ4 resultados. | 59 |
| Figura 4.1: Instalación multifamiliar: todo centralizado. | 61 |
| Figura 4.2: Pantalla CHEQ4 localización del caso de referencia. | 64 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.3: Pantalla CHEQ4 configuración del caso de referencia. | 65 |
| Figura 4.4: Pantalla CHEQ4 demanda del caso de referencia. | 66 |
| Figura 4.5: Pantalla CHEQ4 solar/apoyo del caso de referencia. | 67 |
| Figura 4.6: Pantalla CHEQ4 otros parámetros del caso de referencia. | 68 |
| Figura 4.7: Pantalla CHEQ4 resultados del caso de referencia. | 68 |
| Figura 4.8: Gráfica influencia del tamaño de la instalación. | 70 |
| Figura 4.9: Comparación resultados CHEQ4 y f-Chart. | 72 |
| Figura 4.10: Comparación CHEQ4 y TRNSYS. | 73 |

Notación

| | |
|---------------------------|---|
| A | Área del captador [m^2]. |
| C_p | Calor específico del fluido caloportador [J/KgK]. |
| Δt | Número de segundos en un mes [s]. |
| E_L | Calor aportado por el sistema auxiliar para calefacción [W]. |
| E_w | Calor aportado por el sistema auxiliar para ACS [W]. |
| ε | Efectividad del intercambiador de calor. |
| F_R | Factor de evacuación de calor. |
| $F_R(\tau\alpha)$ | Factor óptico o de ganancias. |
| $F_R U_L$ | Factor de pérdidas [$\text{W/m}^2\text{K}$]. |
| H_T | Radiación en captador por unidad de área [MJ/m^2] |
| $\overline{H_T}$ | Radiación diaria media mensual en el captador por unidad de área [$\text{MJ/m}^2\text{día}$]. |
| I | Radiación incidente [J/m^2]. |
| L | Demanda térmica mensual [J/mes]. |
| \dot{m} | Caudal de fluido que circula por el captador [kg/s]. |
| N | Número de días del mes [día/mes]. |
| Q_L | Demanda para calefacción [W]. |
| Q_w | Demanda para ACS [W]. |
| T_a | Temperatura ambiente [$^{\circ}\text{C}$]. |
| $\overline{T_a}$ | Temperatura media mensual exterior [$^{\circ}\text{C}$]. |
| T_{ac} | Temperatura de preparación del agua caliente [$^{\circ}\text{C}$]. |
| T_{af} | Temperatura del agua fría [$^{\circ}\text{C}$]. |
| T_{am} | Temperatura ambiente media exterior [$^{\circ}\text{C}$]. |
| T_{fe} | Temperatura de entrada al captador [$^{\circ}\text{C}$]. |
| T_{fs} | Temperatura de salida del fluido [$^{\circ}\text{C}$]. |
| T_i | Temperatura de salida al intercambiador de calor [$^{\circ}\text{C}$]. |
| T_o | Temperatura de entrada al intercambiador de calor [$^{\circ}\text{C}$]. |
| $\overline{T_p}$ | Temperatura media de la placa [$^{\circ}\text{C}$]. |
| T_{ref} | Temperatura de referencia [$^{\circ}\text{C}$]. |
| $(\tau\alpha)$ | Producto transmitancia-absortancia del captador [ppu]. |
| $(\overline{\tau\alpha})$ | Producto transmitancia-absortancia medio mensual del captador [ppu]. |
| $(\tau\alpha)_n$ | Producto transmitancia-absortancia normal [ppu]. |
| U_L | Coefficiente de pérdidas del captador [$\text{W/m}^2\text{K}$]. |
| U_t | Coefficiente de pérdidas de tubería [$\text{W/m}^2\text{K}$] |

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Objetivo del proyecto

El presente proyecto tiene como objetivo el estudio de la influencia de las pérdidas en la red de transporte en el rendimiento de los sistemas de energía solar. Para ello, se compararán la fracción solar necesaria que ofrecen los métodos f-Chart, CHEQ4 y TRNSYS. Éstas son las herramientas fundamentales que se utilizan para calcular las características de los sistemas solares a baja temperatura.

En primer lugar, se determinará dicha fracción solar a través del método f-Chart empleando la herramienta Excel. A continuación, se utilizará con los mismos datos de entrada, el programa CHEQ4. Dicho software, a diferencia del método utilizado anteriormente, tendrá en consideración las pérdidas que se producen en la red de distribución del agua caliente sanitaria. Finalmente, se empleará el programa TRNSYS donde se encontrará programada la instalación empleada. Se estudiarán de esta forma varios casos modificando la ubicación (Madrid, Sevilla, Bilbao), el área de captación y la longitud de la red de distribución con el fin de observar como varían las pérdidas.

1.2. Energía solar térmica a baja temperatura

La energía solar térmica a baja temperatura juega un papel importante en el consumo energético aportando importantes beneficios económicos y medioambientales. En España, el uso de energía solar térmica desde el año 2000 ha experimentado un crecimiento constante, convirtiéndose en el segundo mercado europeo más importante de este tipo de energía.

1.2.1 Estado actual del consumo energético en España

En la actualidad, España utiliza principalmente como fuente energética en el consumo final de energía derivados del petróleo (60%). Seguidos a esta fuente se encuentran la electricidad (20%) y

gas natural (16%). El gas natural es el que ha ido creciendo más a lo largo de los años, disminuyéndose el uso del carbón y de los gases derivados. El uso de energías renovables ha ido en aumento en nuestro país pero levemente. El aumento de este tipo de fuente de energía es de importancia debido a que son prácticamente inagotables y con un menor impacto medioambiental. Además, España al no encontrarse cerca de yacimientos, necesita importar la mayor parte del petróleo y gas natural que consume del exterior.

Aunque parezca contradictorio, España es el cuarto país europeo en el aprovechamiento de la energía solar térmica, por delante de países como Italia, Francia o Gran Bretaña. Es por ello que España cuenta con un gran potencial para la utilización de las energías renovables, más concretamente la energía solar.

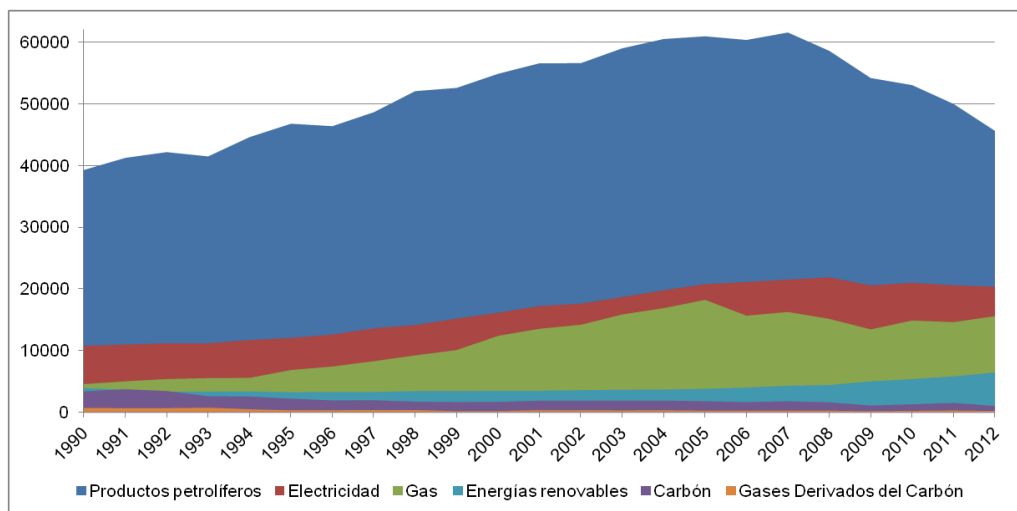


Figura 1.1: Evolución del consumo de energía final en España por fuentes (1990-2012).

El consumo medio de un hogar español es de 10521 kWh al año (0,038 TJ), siendo predominante, en términos de energía final, el consumo de combustibles siendo éstos 1,8 veces superior al consumo eléctrico. El 62% del consumo eléctrico procede de los electrodomésticos, y en menor medida de la iluminación, cocina y de los servicios de calefacción y agua caliente.

Si se considera el conjunto de servicios y equipamiento disponible en los hogares españoles, es el servicio de la calefacción el mayor demandante de energía, siendo casi la mitad de todo el consumo del sector. A continuación le proceden los electrodomésticos, el agua caliente sanitaria, la cocina, la iluminación y el aire acondicionado. Entre los electrodomésticos, destacan los frigoríficos, las lavadoras, las televisiones y los sistemas de Standby, llegando estos últimos a representar el 2,3%

del consumo, casi el triple que el consumo asociado a los servicios de refrigeración, y de un peso similar a los consumos en televisión.

Por ello, con la utilización de instalaciones solares térmicas de producción de agua caliente sanitaria dentro del sector doméstico se conseguirá un descenso del consumo energético.

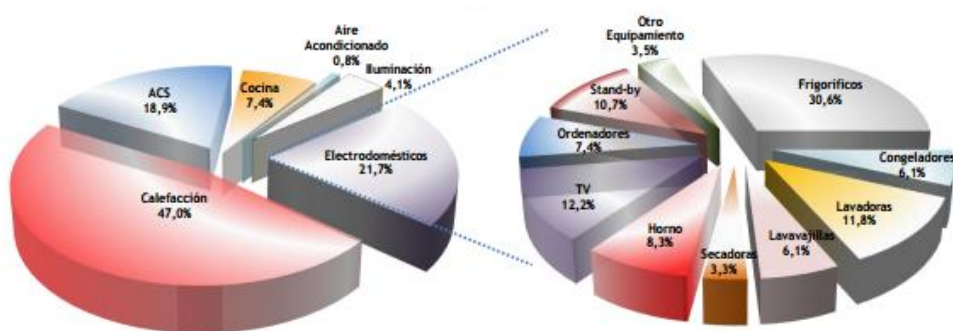


Figura 1.2: Estructura de consumo según usos energéticos en el sector doméstico.

1.2.2 Estado actual de la energía solar térmica en España

Desde el año 2000 el mercado solar térmico ha ido experimentando un crecimiento constante. Gracias al crecimiento que se experimentó en 2008 y 2009, España se ha convertido en el segundo mercado europeo más importante de energía solar.

Se produjo un descenso de la actividad desde 2007 debido a la crisis producida de la construcción, que provocó una caída de alrededor de un 25% en la instalación de nueva capacidad en 2009 respecto a 2008. Este descenso siguió produciéndose los años siguientes hasta el 2015, a pesar que a partir del 2011 se mantuvo prácticamente constante. La caída de la actividad en el mercado durante el 2015 es debida al descenso de la actividad registrada de los dos principales segmentos del mercado, como son el de la nueva vivienda construida y regulada a través del código técnico de la edificación y el de los programas de apoyo de las comunidades autónomas.

La aplicación más importante de la energía solar térmica en España es la producción de agua caliente sanitaria, suponiendo un 98% del total. En cuanto a los captadores más usados, los captadores planos suponen un 50% sobre el total, siguiéndoles en orden de magnitud los sistemas prefabricados (44%), los tubos de vacío (5%) y los captadores de plástico (1%).

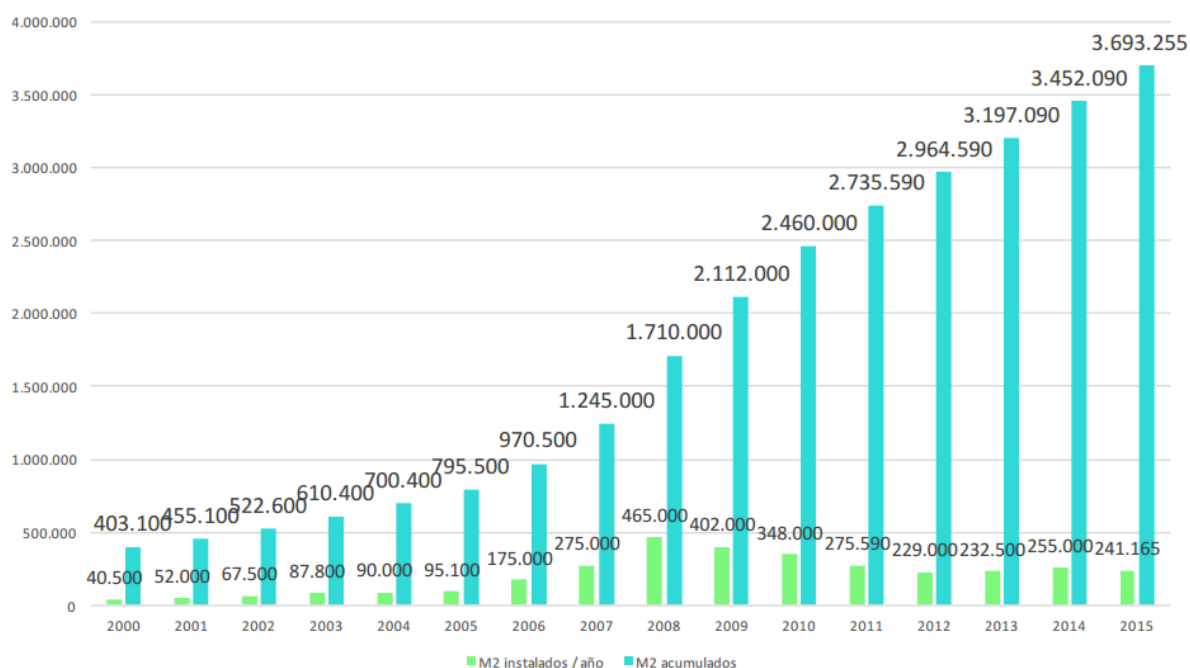


Figura 1.3: Evolución de la energía solar térmica en España.

1.3. Organización y contenido del proyecto

En el presente proyecto se ha elaborado un análisis comparativo de los métodos de simulación f-chart, CHEQ4 y TRNSYS en instalaciones de consumo múltiple con todo centralizado. Además, se ha estudiado la influencia de las pérdidas en la red de distribución de la instalación. Para ello, se ha desarrollado un documento dividido en cinco capítulos.

En el primer capítulo, se expone una introducción al proyecto donde se detalla el objetivo del mismo así como una breve introducción de la energía solar térmica a baja temperatura. En este último apartado, se expone el estado actual del consumo energético y de la energía solar térmica en España.

A continuación, en el segundo capítulo se tratan las instalaciones de energía solar para la producción de agua caliente sanitaria. Se encontrará una clasificación de este tipo de instalaciones así como una descripción detallada de los equipos y sus componentes.

En el tercer capítulo, se desarrollan los métodos de cálculo de las instalaciones solares térmicas a baja temperatura: f-Chart, CHEQ4 y TRNSYS, para su posterior aplicación y comparación.

En el cuarto capítulo, se lleva a cabo el estudio de los casos. Para ello, se procederá a la descripción detallada de los casos de simulación. Finalmente, se exponen los resultados obtenidos en las simulaciones.

Para finalizar, en el quinto capítulo, se expone un resumen del proyecto y las conclusiones obtenidas de los estudios realizados.

2. INSTALACIONES DE ENERGÍA SOLAR PARA PRODUCCIÓN DE ACS

2.1. Introducción

En este capítulo del documento se llevará a cabo una descripción detallada de las instalaciones de energía solar para la producción de agua caliente sanitaria. En primer lugar, se definirán los subsistemas que componen este tipo de instalaciones así como una clasificación de éstas. A continuación, se analizarán cada uno de los elementos que las componen uno a uno.

2.2. Instalaciones de energía solar para producción de ACS

La producción de ACS mediante energía solar se puede obtener a través de una gran diversidad de esquemas de principio. Sin embargo, todos tienen en común los subsistemas representados en la figura 2.1.

- Subsistema de captación. Está compuesto de captadores solares. Éstos reciben la energía del Sol y la transmite al fluido caloportador que lo transporta hasta los elementos de intercambio o de acumulación, dependiendo de la instalación.
- Subsistema de acumulación. Almacena la energía interna producida en la instalación.
- Subsistema de intercambio. Realiza la transferencia de calor entre fluidos que circulan por circuitos diferentes.
- Subsistema de transporte o de circulación. Está formado por tuberías y elementos de impulsión y aislamiento térmico adecuados, diseñados para transportar la energía producida.
- Subsistema de apoyo o auxiliar. Es el elemento de apoyo a la instalación solar para complementar el aporte solar en periodos de escasa radiación solar o de demanda de energía superior a la prevista de manera que siempre se supla la demanda térmica del usuario.
- Subsistema de control. Este subsistema asegura el correcto funcionamiento del conjunto.

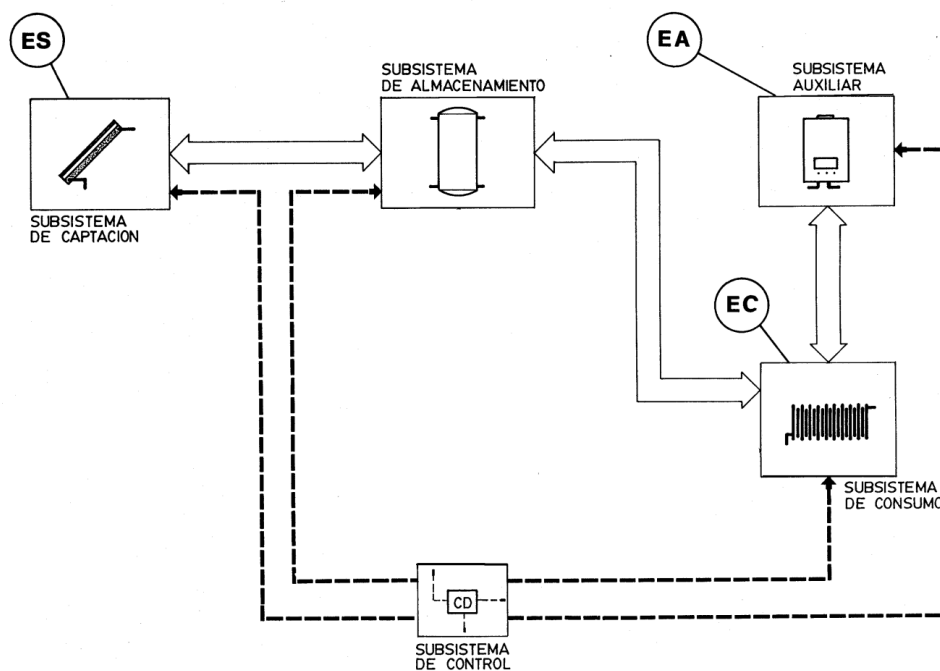


Figura 2.1: Esquema general de funcionamiento.

2.3. Clasificación de instalaciones

Las instalaciones de energía solar para la producción de agua caliente sanitaria se pueden clasificar según los siguientes criterios:

- El principio de circulación.
- El sistema de transferencia de calor.
- El sistema de expansión.
- El sistema de energía auxiliar.
- La aplicación.

2.3.1. Principio de circulación

En la clasificación según el principio de circulación se pueden distinguir dos tipos de instalaciones: termosifónicas y forzadas. En las primeras, el fluido circula por convección natural, mientras que en las instalaciones de circulación forzada se dota a la instalación de un dispositivo que provoca la circulación del fluido de trabajo.

- **Instalaciones por termosifón o circulación natural**

En estas instalaciones el movimiento del fluido de trabajo se produce por variaciones de densidad de fluido, como consecuencia, a su vez, de variaciones en su temperatura. El fluido contenido en los captadores, al recibir la radiación solar se calienta, aumentando su temperatura y disminuyendo, por tanto, su densidad. Al pesar menos, dicho fluido asciende hacia la parte alta del circuito, mientras que el fluido frío contenido en el acumulador, con mayor densidad, se desplaza hacia la parte baja de la instalación por la tubería de entrada a los captadores. Así se genera una circulación del fluido que se mantiene siempre que exista un gradiente de temperaturas entre el fluido de los captadores y el del acumulador, y cesa cuando las temperaturas se igualan. Este tipo de instalaciones es el más adecuado en zonas climáticas cálidas. El acumulador normalmente se encuentra en el exterior, dando lugar a diferentes configuraciones.

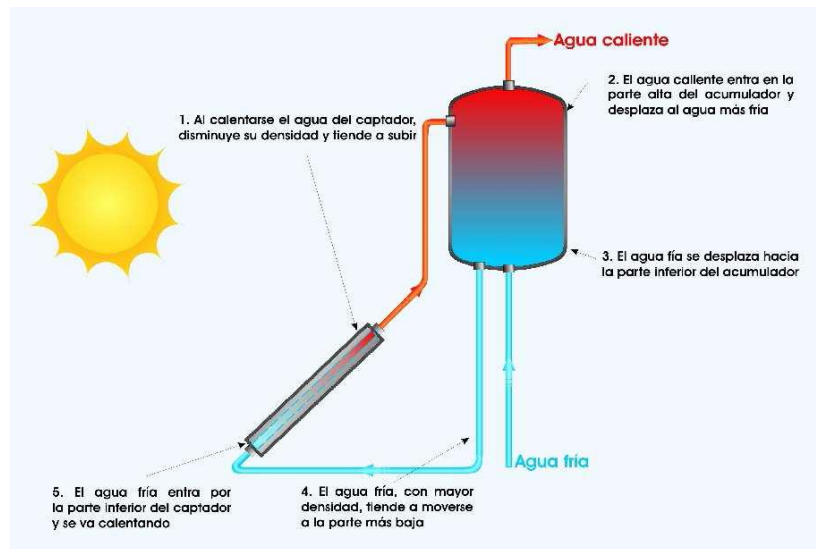


Figura 2.2: Instalación por termosifón.

- **Instalaciones por circulación forzada**

El movimiento del fluido se realiza a través de una bomba que es capaz de establecer un caudal y vencer las pérdidas de carga del circuito.

La regulación de la bomba de circulación se debe efectuar por medio de un control diferencial de temperaturas que la active cuando exista posibilidad de ganancia de energía térmica en el

acumulador. Habitualmente las sondas comparativas del control diferencial se colocan a la salida de captadores (punto de mayor temperatura del sistema) y en la parte inferior del acumulador solar (punto de referencia de la temperatura del acumulador solar). Este sistema se regula con centralitas de control diferencial de fácil manejo y programación y con diversas utilidades en función de la complejidad de la instalación.

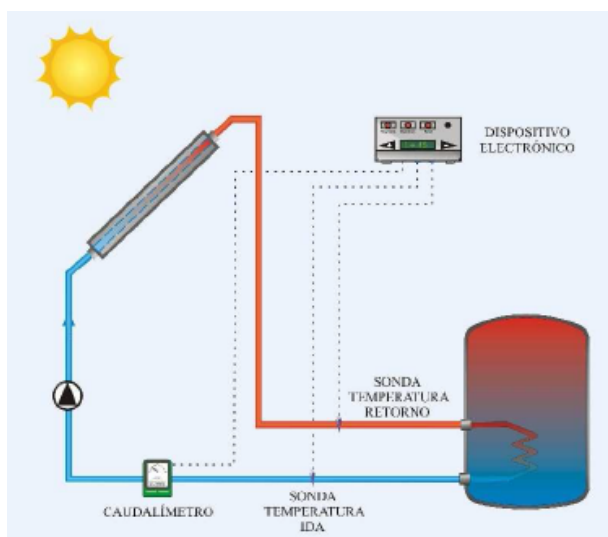


Figura 2.3: instalación por circulación forzada.

2.3.2. Sistema de transferencia de calor

Si se clasifica según el sistema de transferencia de calor, se distinguirán la instalación con sistema de intercambio interno o externo al acumulador. Ambos tipos de instalaciones cuentan con dos tipos de intercambiadores: el intercambiador solar y el intercambiador de consumo.

El intercambiador solar es el encargado de que se produzca la transferencia de calor entre el fluido que circula por el circuito primario y el fluido que circula por el circuito secundario o el que se encuentra en el acumulador solar. Este intercambiador puede encontrarse en el interior del acumulador solar (interacumulador) como son los de serpentín o de doble envoltente. También pueden funcionar externamente, como son los intercambiadores de placas.

El intercambiador de consumo es el que realiza la transferencia de calor entre el fluido que circula por el circuito terciario y el agua de consumo.

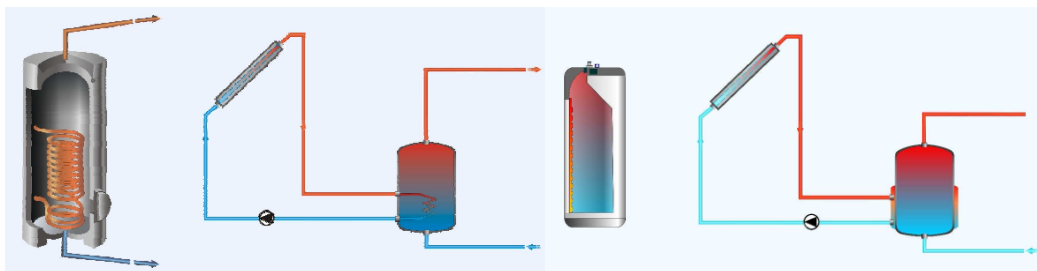


Figura 2.4: Sistemas de intercambio interno con serpentín y de doble envoltente.

2.3.3. Sistema de expansión

En las instalaciones solares para ACS es necesario el uso de un sistema de expansión. Esto es debido a las variaciones de volumen que experimenta el fluido del circuito primario al ser sometido a grandes cambios de temperatura. Esta temperatura puede variar desde valores bajo cero hasta superiores a 100°C. Según el sistema de expansión se podrán diferenciar dos tipos de sistemas: abierto o cerrado.

- Sistema abierto. Son las instalaciones en las que el circuito primario se encuentra comunicado permanentemente con la atmósfera.
- Sistema cerrado. En estas instalaciones el circuito primario no tiene comunicación directa con la atmósfera.

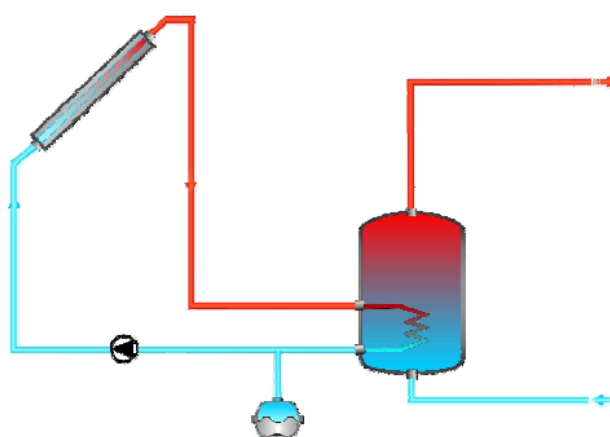


Figura 2.5: Instalación con vaso de expansión cerrado.

2.3.4. Sistema de energía auxiliar

Por el sistema de aporte de energía auxiliar se distinguirán los siguientes sistemas:

- Sistema de energía auxiliar en el acumulador solar.
- Sistema de energía auxiliar en acumulador secundario individual.
- Sistema de energía auxiliar en acumulador secundario centralizado.
- Sistema de energía auxiliar en acumuladores secundarios distribuidos.
- Sistema de energía auxiliar en línea centralizado.
- Sistema de energía auxiliar en línea distribuido.
- Sistema de energía auxiliar en paralelo.

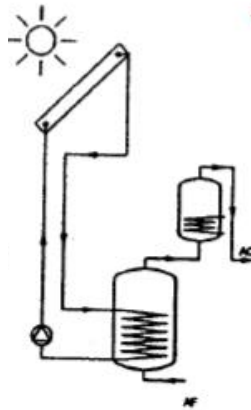


Figura 2.4: Sistema de energía auxiliar en el acumulador solar.

2.3.5. Aplicación

Actualmente, las principales aplicaciones de los sistemas de energía solar son:

- Instalaciones para calentamiento de agua sanitaria.
- Instalaciones para usos industriales.
- Instalaciones para calefacción.
- Instalaciones para refrigeración.
- Instalaciones para climatización de piscinas.
- Instalaciones de uso combinado.
- Instalaciones de precalentamiento.

2.4. Equipos y componentes de la instalación

2.4.1. Captador solar

El captador solar térmico es el elemento más importante que poseen las instalaciones solares. Está diseñado de manera que recibirá la mayor cantidad de radiación solar posible, transfiriéndola más adelante a un fluido térmico que circula por su interior. Existen varios tipos de captadores en el mercado, aunque los más empleados en las instalaciones de ACS mediante energía solar es el captador solar plano con cubierta. Éstos a diferencia de los que no cuentan con cubierta, cuentan con una cubierta de vidrio o plástico siendo capaz de aprovechar el efecto invernadero obteniendo un mejor rendimiento. Este rendimiento siempre debe ser igual o superior al 40% independientemente de la aplicación y tecnología usada.

Los principales componentes que posee un captador solar son los que se muestran en el dibujo de la figura 2.6 y que se detallarán uno a uno a continuación.

La cubierta transparente es un elemento de material transparente y suele usarse de vidrio frente a cubiertas plásticas. Es el encargado de que se produzca el efecto invernadero sobre la placa absorbente, de tal manera que deja pasar en su mayor parte (alta transmitancia) la radiación solar incidente e impide la salida (baja transmitancia) de la radiación infrarroja producida en la placa absorbente.

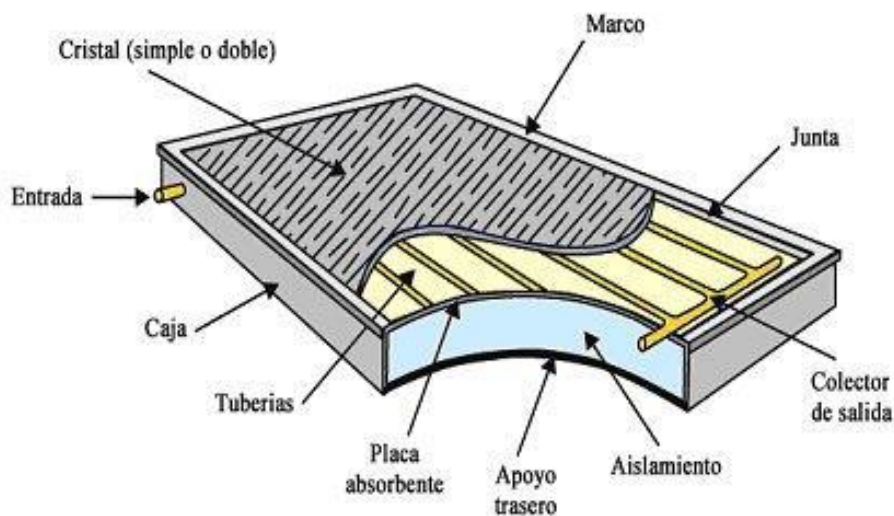


Figura 2.6: Elementos de un captador solar plano.

En cuanto a la placa absorbente nombrada anteriormente, es la parte del dispositivo donde se produce la conversión de la radiación en energía interna del fluido y que está compuesto por una lámina metálica o varias aletas adheridas. El material más empleado es el cobre con algún tipo de tratamiento (pintura negra u otros) mejorando de esta forma sus prestaciones. El absorbedor más utilizado es el de parrilla que está formado por varias tuberías paralelas que se unen a los conductos de distribución.

Se colocará un aislamiento térmico en los laterales y en el fondo de la carcasa con el fin de disminuir las pérdidas térmicas. Normalmente esta compuesto de lana mineral o fibra de vidrio. Para proteger todos los elementos del captador del exterior se colocarán en el interior de una carcasa o caja, compuesto de aluminio o acero galvanizado. Además se empleará una junta transparente en la cubierta para mantener la estanqueidad del captador impidiendo la entrada de agua en caso de lluvia.

Por último, se cuenta con los tubos de intercambio que se encuentran soldados o embutidos en la placa absorbente y suelen ser de cobre. La disposición de los tubos pueden ser de tipo parrilla o serpentin. Para su utilización, se deberá contar que el diámetro de los tubos condicionará las pérdidas de carga y por tanto, el comportamiento hidráulico de la instalación.

- **Ecuaciones del captador**

La ecuación característica del captador solar es la energía captada con la que se podrá evaluar la energía útil que es capaz de captar. La expresión es igual a la energía incidente menos las pérdidas que se producen sobre él.

$$Energía_{captada} = Q_u = Energía_{incidente} - Pérdidas \quad (2.1)$$

Donde cada uno de los términos tendrá la forma de las expresiones de (2.2) y (2.3).

$$Energía_{incidente} = I(\tau\alpha)A \quad (2.2)$$

$$Pérdidas = U_L A (\bar{T}_p - T_a) \quad (2.3)$$

La energía captada por el captador se puede definir de la siguiente forma que se muestra en la ecuación (2.4).

$$Q_u = MC_p(T_{fs} - T_{fe}) \quad (2.4)$$

Como es difícil calcular la temperatura media de la placa, se emplea el concepto del factor de evacuación del calor o eficacia del captador (F_R). Este factor se define como la relación entre el calor transferido y el máximo que sería capaz de transferir.

$$F_R = \frac{Q_u}{I(\tau\alpha)A - U_L A(T_{fe} - T_a)} \quad (2.5)$$

Utilizando este factor la energía captada por el captador quedará como la expresión (2.6).

$$Q_u = IF_R(\tau\alpha)A - F_R U_L A(T_{fe} - T_a) \quad (2.6)$$

- **Recta rendimiento de un captador**

El rendimiento del captador solar se define como el cociente de la energía térmica útil extraída por el fluido de trabajo entre la energía incidente sobre él.

$$\eta = \frac{\text{Energía}_{captada}}{\text{Energía}_{incidente}} = \frac{Q_u}{IA} \quad (2.7)$$

Si se introduce la expresión (2.6) en la ecuación anterior, el rendimiento quedará como la ecuación (2.8).

$$\eta = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_{fe} - T_a)}{I} \quad (2.8)$$

En el procedimiento de ensayo de captadores se encuentra en condiciones de incidencia normal, fijándose el caudal de ensayo y modificándose la temperatura de entrada al captador. La ecuación de la recta de rendimiento queda de la siguiente forma:

$$\eta = F_R(\tau\alpha)_n - F_R U_L \frac{(T_{fe} - T_a)}{I} \quad (2.9)$$

Si las condiciones son distintas a las condiciones de ensayo, se deberán utilizar unas ciertas correcciones. La ecuación del rendimiento del captador tiene dependencia funcional de:

- Condiciones ambientales: depende de la temperatura ambiente y de la irradiancia. Si alguna de éstas aumenta, disminuirán las pérdidas provocando un aumento del rendimiento del captador.
- Condiciones operacionales: el rendimiento es función de la temperatura de entrada del fluido. Si aumenta dicha temperatura, las pérdidas en el captador aumentarán disminuyendo su rendimiento.
- Captador solar: el rendimiento de un captador dependerá de las características que éste tenga, es decir, cual sea su factor óptico y de pérdidas.

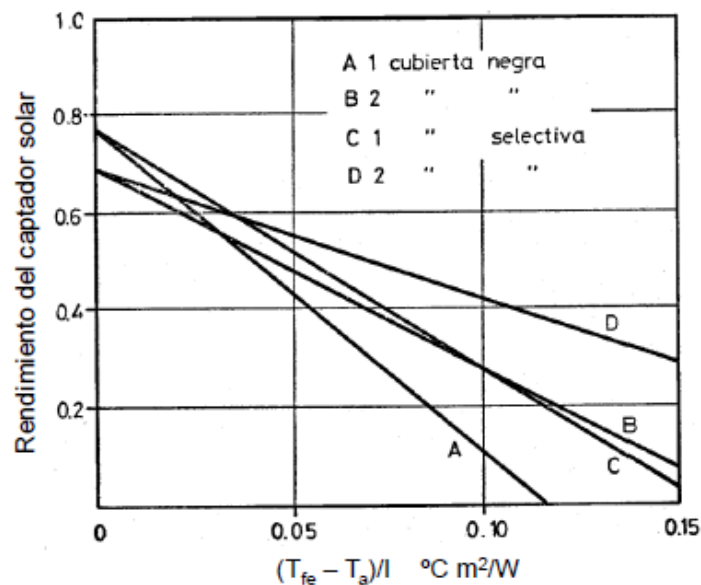


Figura 2.7: Recta rendimiento para diferentes tipos de captador.

Por otro lado, el coeficiente global de pérdidas variará con la temperatura mediante la expresión (2.10).

$$U_L = U_0 + U_1(T_{fe} - T_a) \quad (2.10)$$

Si se introduce la ecuación anterior en la recta de rendimiento, se tendrá la expresión (2.11).

$$\eta = F_R(\tau\alpha) - \frac{F_R[U_0 + U_1(T_{fe} - T_a)](T_{fe} - T_a)}{I} \quad (2.11)$$

Quedando el rendimiento de la siguiente forma:

$$\eta = F_R(\tau\alpha) - F_R U_0 \frac{(T_{fe} - T_a)}{I} - F_R U_1 \frac{(T_{fe} - T_a)^2}{I} \quad (2.12)$$

- **Correcciones de la recta de rendimiento**

El rendimiento normalizado del captador solar tiene la forma de la ecuación (2.13). Este rendimiento es válido para un captador solar o agrupación de captadores solares que trabajen en las mismas condiciones, con incidencia normal y con el caudal de ensayo.

$$\eta = F_R(\tau\alpha)_n - F_R U_L \frac{(T_{fe} - T_a)}{I} \quad (2.13)$$

Para generalizar los resultados del ensayo hay que corregir por: caudal real de funcionamiento, agrupación de captadores, pérdidas en el primario y acoplamiento con otros equipos (intercambiador de calor).

- Corrección por caudal en captadores solares

Mediante la corrección por caudal se podrá ajustar los parámetros de ensayo al caso que se tiene real. Esto es debido a que el caudal que circula por los captadores solares en las pruebas de ensayos no tiene porqué coincidir con el que se está trabajando en condiciones reales. Se aplicará la siguiente corrección:

$$F'U_L = F'U_L|_{ensayo} = -GC_p \ln \left[1 - \frac{F_R U_L}{GC_p} \right] \quad (2.14)$$

$$C_M = \frac{F_R|_{instalación}}{F_R|_{ensayo}} = \frac{GC_p \left(1 - \exp \left(-\frac{F'_R U_L}{GC_p} \right) \right) \Big|_{instalacion}}{GC_p \left(1 - \exp \left(-\frac{F'_R U_L}{GC_p} \right) \right) \Big|_{ensayo}} \quad (2.15)$$

- Corrección por agrupación de captadores

El siguiente factor de corrección a aplicar es la corrección por agrupación de captadores. Ésta consiste en definir el área y los parámetros de la recta rendimiento de un único captador equivalente a la agrupación de captadores.

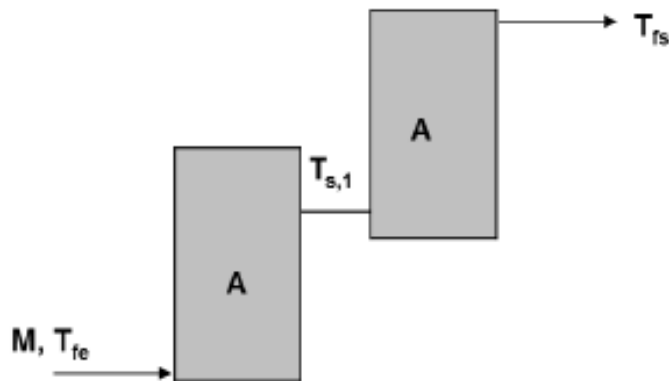


Figura 2.5: Esquema de captadores en serie.

En el esquema de la figura 2.5 se tienen dos captadores iguales conectados en serie y en cada uno de ellos se mantiene el caudal específico. La temperatura del agua a la salida del primer captador ($T_{s,1}$) es superior a la de entrada (T_{fe}) porque ha sido aumentada en el paso de dicho captador. De esta forma, la temperatura de entrada al segundo captador es mayor que la temperatura inicial, haciendo que disminuya la eficiencia de éste.

La energía solar captada por el primer captador solar se puede desarrollar como:

$$Q_{u,1} = AF_R(\tau\alpha)I - AF_RU_L(T_{fe} - T_a) = MC_p(T_{s,1} - T_{fe}) \quad (2.16)$$

De forma análoga se tendrá la energía absorbida por el segundo captador solar:

$$Q_{u,2} = AF_R(\tau\alpha)I - AF_RU_L(T_{s,1} - T_a) = MC_p(T_{fe} - T_{s,1}) \quad (2.17)$$

Cumplíndose por tanto que:

$$T_{s,1} = T_{fe} + \frac{Q_{u,1}}{MC_p} \quad (2.18)$$

$$T_{fe} = T_{s,1} + \frac{Q_{u,2}}{MC_p} \quad (2.19)$$

Si se sustituye $T_{s,1}$ en la ecuación del segundo captador se tiene que:

$$Q_{u,2} = AF_R(\tau\alpha)I - AF_RU_L \left(T_{fe} - T_a + \frac{Q_{u,1}}{MC_p} \right) = Q_{u,1} - \frac{AF_RU_L}{MC_p} Q_{u,1} = (1 - K)Q_{u,1} \quad (2.20)$$

Donde K tendrá la siguiente forma:

$$K = \frac{AF_R U_L}{MC_p} = \frac{F_R U_L}{G C_p} \quad (2.21)$$

La energía solar captada por los dos captadores en serie:

$$Q_u = Q_{u,1} + Q_{u,2} = Q_{u,1} + (1 - K)Q_{u,1} = \left[1 - \frac{K}{2}\right] 2Q_{u,1} \quad (2.22)$$

$$\begin{aligned} Q_u &= 2AF_R(\tau\alpha) \left[1 - \frac{K}{2}\right] I - 2AF_R U_L \left[1 - \frac{K}{2}\right] (T_{fe} - T_a) \\ &= A^* F_R^* (\tau\alpha) I - A^* F_R^* U_L (T_{fe} - T_a) \end{aligned} \quad (2.23)$$

Equivalen por tanto a un único captador de área 2A y parámetros de recta de rendimiento iguales a los del captador original multiplicados por el factor corrector que siempre será menor que la unidad.

$$C_A = 1 - \frac{K}{2} \quad (2.24)$$

Si se cuenta con una agrupación con N captadores iguales en serie, el factor corrector será la ecuación (2.25).

$$C_A = \frac{1 - (1 - K)^N}{NK} \quad (2.25)$$

$$F_R^*(\tau\alpha) = F_R(\tau\alpha) \left[\frac{1 - (1 - K)^N}{NK} \right] \quad (2.26)$$

$$F_R^*U_L = F_RU_L \left[\frac{1 - (1 - K)^N}{NK} \right] \quad (2.27)$$

La expresión del factor corrector permite analizar la influencia en el rendimiento del número de captadores en serie.

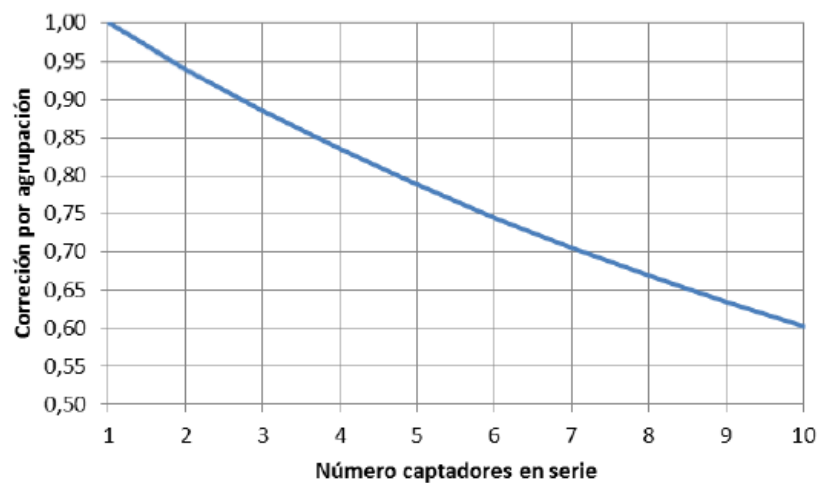


Figura 2.6: Influencia en el rendimiento del número de captadores en serie.

- Corrección por pérdidas térmicas en el circuito primario

Las pérdidas térmicas en el circuito primario reducen la energía solar útil captada, disminuyendo el rendimiento del sistema. La corrección por pérdidas en el primario consistirá en definir el área y los parámetros de la recta de rendimiento de un captador equivalente sin pérdidas en el circuito de captación.

Como bien muestra la figura 2.7, el fluido entra en el conducto donde se producen pérdidas de

temperatura debido a la diferencia con respecto a la temperatura ambiente. De esta forma, la temperatura del fluido se disminuirá antes de entrar al captador solar. Esta temperatura se reduce hasta el valor de T_o al perder calor con el ambiente, cuando pasa el fluido caliente a través de los conductos de salida.

La energía útil captada será igual:

$$Q_u = M_B C_p (T_o - T_i) \quad (2.28)$$

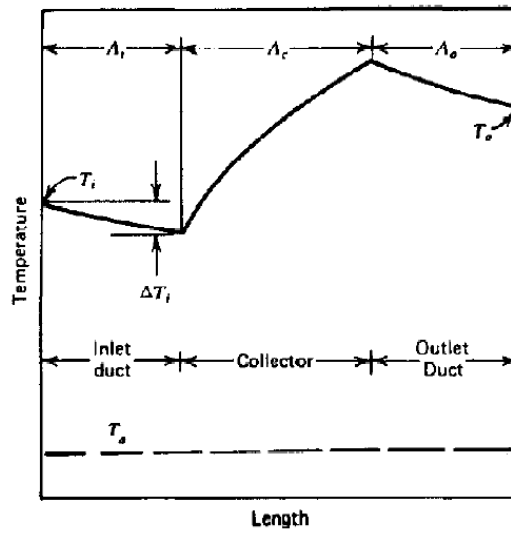


Figura 2.7: Distribución de temperatura a través de los captadores.

Esta energía útil se puede expresar también como la ganancia del captador menos las pérdidas que se producen en los conductos:

$$Q_u = F_R (\tau \alpha) I A - F_R U_L A (T_{fe} - T_a) - \text{Pérdidas} \quad (2.29)$$

Donde

$$T_{fe} = T_i - \Delta T_i \quad (2.30)$$

Las pérdidas en conductos serán iguales a la integral de las pérdidas entre la entrada y la salida:

$$Pérdidas = \int U_t(T - T_a)dA \approx U_t \int (T - T_a)dA \approx U_t A(T_{rep} - T_a) \quad (2.31)$$

$$P_i = U_t A_i(T_i - T_a) \approx M_B C_p \Delta T_i \quad (2.32)$$

$$P_o = U_t A_o(T_o - T_a) = U_t A_o(T_i - T_a) + U_t A_o(T_o - T_i) \quad (2.33)$$

Si se eliminan ΔT_i , T_{fe} y T_o con las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$\begin{aligned} Q_u &= AF_R \frac{(\tau\alpha)}{1 + \frac{U_t A_o}{M_B C_p}} I - AF_R U_L \frac{1 - \frac{U_t A_i}{M_B C_p} + \frac{U_t(A_i + A_o)}{AF_R U_L}}{1 + \frac{U_t A_o}{M_B C_p}} (T_i - T_a) \\ &= F_R(\tau\alpha)^* I A - F_R U_L^* A(T_i - T_a) \end{aligned} \quad (2.34)$$

Equivale por tanto a un captador de área A y parámetros de recta de rendimiento iguales a los del captador original multiplicados por los factores correctores:

$$\frac{(\tau\alpha)^*}{(\tau\alpha)} = \frac{1}{1 + \frac{U_t A_o}{M_B C_p}} \quad (2.35)$$

$$\frac{U_L^*}{U_L} = \frac{1 - \frac{U_t A_i}{M_B C_p} + \frac{U_t(A_i + A_o)}{AF_R U_L}}{1 + \frac{U_t A_o}{M_B C_p}} \quad (2.36)$$

- Corrección por Intercambiador de Calor

En el circuito de captación suele existir un intercambiador de calor que aumenta el gradiente entre la acumulación y el captador, disminuyendo su rendimiento. La corrección por intercambiador de calor consiste en definir el área y los parámetros de la recta de rendimiento de un único captador equivalente sin intercambiador y con el captador calculado corregido.

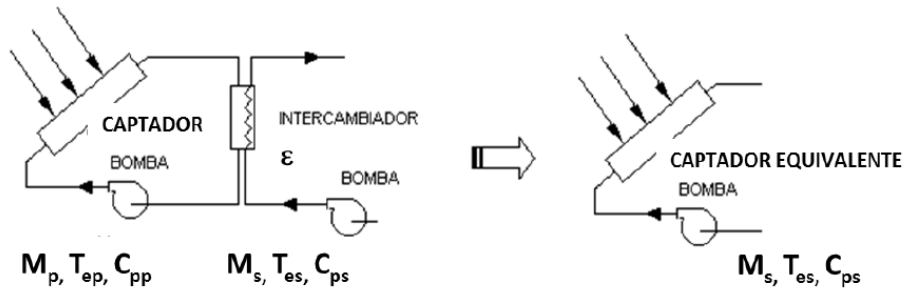


Figura 2.8: Esquema de instalación con intercambiador de calor

La energía útil captada será:

$$Q_u = F_R(\tau\alpha)IA - F_R U_L A(T_{fe} - T_a) \quad (2.37)$$

Dicha energía útil también se consigue mediante un balance en el captador y en el circuito primario:

$$Q_u = M_p C_{pp}(T_{sp} - T_{ep}) = M_s C_{ps}(T_{ss} - T_{es}) \quad (2.38)$$

Además, la energía transferida en el intercambiador será:

$$Q_u = \epsilon C_{min}(T_{sp} - T_{es}) \quad (2.39)$$

Siendo:

$$C_{min} = (MC_p)_{min} \quad (2.40)$$

Eliminando T_{ep} , T_{sp} y T_{ss} con las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$Q_u = \frac{F_R}{K_{int}} (\tau\alpha) IA - \frac{F_R}{K_{int}} U_L A (T_{es} - T_a) = F'_R (\tau\alpha) IA - F'_R U_L A (T_{es} - T_a) \quad (2.41)$$

Equivalen por tanto a un captador de área A y parámetros de recta de rendimiento iguales a los del captador original multiplicados por el factor corrector:

$$C_I = \frac{1}{K_{int}} = \left[1 + \frac{F_R U_L A}{M_p C_{pp}} \left(\frac{M_p C_{pp}}{\varepsilon C_{min}} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (2.42)$$

2.4.2. Sistema de acumulación

El sistema de acumulación lo constituyen uno o varios depósitos dispuestos como almacenamiento del agua caliente para hacer frente al consumo de ACS en el momento en el que sea requerida. Este momento no tiene por qué coincidir con el momento de producción del ACS. Debido a esto, el sistema de acumulación tiene la función de almacenar todo el calor que proviene de los captadores térmicos de la forma más eficiente durante los períodos donde la demanda es escasa, para más tarde suministrar dicha energía de la manera más eficaz cuando se necesite. Para una mejor eficiencia, se tendrá en cuenta una serie de requisitos:

- Un calor específico elevado del medio de acumulación.
- Unas pérdidas térmicas bajas. Esto se logrará disminuyendo la superficie exterior y aplicando un buen aislamiento.

- Una buena estratificación de temperaturas en el acumulador.
- La vida útil sea al menos equivalente al del captador solar.
- Bajo coste y disponibilidad del medio de acumulación.
- Buenas propiedades medioambientales y de higiene del medio de acumulación y del acumulador.
- Capacidad de soportar las temperaturas y presiones de trabajo.

Preferentemente, el sistema de acumulación estará constituido por un sólo depósito de configuración vertical y ubicado en zonas interiores de la edificación. El volumen de acumulación podrá fraccionarse en dos o más depósitos, que se conectarán, preferentemente, en serie invertida en el circuito de consumo. Sin embargo, también puede optarse por la conexión de acumuladores en paralelo, siendo necesario en este caso, que los circuitos estén equilibrados hidráulicamente. La combinación de la carga de calor (desde circuito primario) en paralelo y la descarga de calor (al circuito de consumo) en serie, es otra alternativa eficaz.

2.4.3. Sistema de intercambio

El sistema de intercambio tendrá la función de intercambiar la energía térmica entre el circuito primario, el cual circula por los captadores, y el circuito secundario. Puede existir también otro intercambiador de calor en el circuito secundario que transfiere el calor al ACS de consumo.

Este sistema es uno de los elementos claves para el buen funcionamiento de la instalación de energía solar térmica. Por esta razón es necesario realizar un correcto dimensionado del mismo. Además deberán cumplir los siguientes requisitos:

- Ser resistentes a los fluidos de trabajo utilizados.
- Ser compatibles con otros materiales presentes en el circuito.
- Ser resistentes a las temperaturas mínimas y máximas que se pueden generar en el sistema.
- Poseer buenas propiedades de conductividad térmica y de transferencia de calor.
- Existencia de una pequeña diferencia de temperatura a través de las paredes intercambiadores.
- Tener poca pérdida de carga.

Los sistemas de intercambio se pueden dividir en dos tipos en función de si están o no integrados dentro del sistema de almacenamiento, teniendo:

- Sistema de intercambio interno: es el que se encuentra dentro del depósito de acumulación en forma de serpentín. Se suelen utilizar para instalaciones de pequeñas dimensiones, hasta unos 10 m² de captadores.
- Sistema de intercambio externo: es aquel que se instala de forma independiente en el exterior del depósito de acumulación. Este sistema tiene como ventaja su alto rendimiento de intercambio genera un sistema más eficiente y un diseño a la medida de las necesidades. Sin embargo, posee una mayor pérdida de carga en el circuito y un coste superior. Son usados en instalaciones de mayores dimensiones, donde la superficie de captación es mayor de 10 m².

Además, el intercambiador puede ser:

- Intercambiador tubular. Éste tiene poca pérdida de carga pero en cambio, tiene baja potencia específica de transmisión. Suelen emplearse en piscinas.
- Intercambiador de placas. Tiene una alta potencia específica de transmisión, un coste bajo y son tamaño pequeño. Sin embargo, tienen una elevada pérdida de carga, teniendo posibilidades de ensuciamiento que hará que disminuya su efectividad.

2.4.4. Circuito hidráulico

El circuito hidráulico está formado por un conjunto de tuberías, bombas, válvulas y accesorios que se encargan de conectar los principales componentes de la instalación solar entre sí. A continuación, se verá cada uno de los componentes de este circuito.

• Tuberías

Son los conductos hidráulicos por donde circula el fluido caloportador y el agua caliente. En la selección del material usado en ellas se considerarán los siguientes aspectos:

- La compatibilidad con el tipo de fluido empleado.
- El comportamiento dentro de los rangos de presiones.
- Las temperaturas de trabajo.
- La resistencia frente a la corrosión.

- La estabilidad respecto a tensiones mecánicas y térmicas.
- La facilidad de instalación.
- La durabilidad.

En las tuberías del circuito primario podrán utilizarse como materiales el cobre y el acero inoxidable, con uniones roscadas, soldadas o embridadas.

En el circuito secundario o de servicio de agua caliente sanitaria podrá utilizarse cobre y acero inoxidable. Además, podrán utilizarse materiales plásticos que soporten la temperatura máxima del circuito, cumplan las normas UNE que le sean de aplicación y esté autorizada su utilización por las Compañías de suministro de agua potable. No se podrán utilizar tuberías de acero negro para circuitos de agua sanitaria.

• **Bombas de circulación**

Una bomba de circulación es un dispositivo electromecánico encargado de hacer circular el fluido de trabajo a través del circuito hidráulico. Es uno de los componentes principales del circuito hidráulico de una instalación solar de circulación forzada.

Las bombas deberán ser resistentes a la presión máxima del circuito y se seleccionarán de forma que el caudal y la pérdida de carga de diseño se encuentren dentro de la zona de rendimiento óptimo especificado por el fabricante.

• **Vaso de expansión**

El dispositivo de expansión es un elemento importante en las instalaciones de energía solar térmica, ya que ayuda a la estabilización del circuito primario en caso de sobrecalentamientos. Su función será absorber las dilataciones y contracciones que se provoquen en el fluido que se encuentra en un circuito cerrado con las variaciones de temperatura. Mediante la utilización de este elemento se evita la pérdida de fluido que tendría lugar al activarse la válvula de seguridad al alcanzarse presiones elevadas en el circuito durante los periodos de alta radiación solar. En este caso, sería necesario rellenar el circuito para mantenerlo presurizado, aumentando de esta forma tanto el coste como la probabilidad de creación de bolsas de aire.

Los vasos de expansión serán preferentemente cerrados en las instalaciones solares, pudiendo también instalarse abiertos en casos de circuitos sin mezclas anticongelantes. Consiste en depósitos metálicos divididos en el interior en dos partes por una membrana de elástica impermeable. Cada lado de la membrana contiene un fluido diferente: aire o gas inerte a la presión de trabajo, situado por debajo de la membrana, y el fluido de trabajo, situado por encima de la membrana, que penetrará en el vaso de expansión al aumentar su temperatura y presión.

Los vasos cerrados se dimensionarán de forma que el depósito de expansión sea capaz de compensar el volumen del medio de transferencia de calor en todo el grupo de captadores completo incluyendo todas las tuberías de conexión entre captadores más un 10 %. Además deberán permitir que justo cuando la radiación solar sea máxima, se pueda restablecer la operación automáticamente.

Los vasos de expansión preferentemente se conectarán en la aspiración de la bomba. La tubería de expansión no se aislará nunca ni presentará llaves de cierre en su recorrido.

- **Aislamiento**

El aislamiento no ha de dejar zonas visibles de tuberías o accesorios, quedando únicamente al exterior los elementos que sean necesarios para el buen funcionamiento y operación de los componentes.

La elección del aislamiento viene determinada por varios factores, entre los que destacan:

- Bajo coeficiente de conductividad térmica.
- Precio bajo (incluida la instalación).
- Colocación relativamente sencilla.
- Gama de temperatura adecuada.
- Ser ignífugo.
- No ser corrosivo para las superficies con las que estará en contacto.
- Ser estable y no enmohecerse.
- Resistencia mecánica buena.
- Peso específico reducido.

El material debe ser capaz de soportar temperaturas elevadas, especialmente en el circuito primario. En el caso de instalaciones en el exterior, también debe ser capaz de soportar la radiación

ultravioleta, humedad y corrosión por agentes externos.

Los materiales habitualmente empelados son las espumas elastoméricas, las cuales se emplean para el aislamiento de intercambiadores exterior.

- **Sistema de llenado y vaciado**

El circuito de una instalación ha de incorporar un sistema de llenado que permita la entrada del fluido de trabajo y mantener presurizado el circuito en caso de que se produzcan fugas de fluido. El sistema de llenado de una instalación puede ser manual o automático.

Para facilitar el vaciado total o parcial de una instalación solar normalmente se instalan en los puntos más bajos tuberías de drenaje a través de las cuales se puede realizar el vaciado mediante la apretura de una válvula de corte colocada en esta tubería.

- **Purgadores**

Los purgadores son los dispositivos encargados de extraer el aire que pudiera existir en las tuberías del circuito, siendo éste perjudicial para el correcto funcionamiento de la instalación. Esto podrá ocurrir tanto durante el proceso de llenado como durante el funcionamiento habitual de la instalación. Pueden ser manuales, acumulando el aire hasta que se afloje la válvula existente, o automáticos, dejando salir el aire cuando se acumula en cierta medida.

Se recomienda que los materiales de los purgadores sean:

- El cuerpo y la tapa de fundición de hierro o de latón.
- El mecanismo de acero inoxidable.
- El flotador y el asiento de acero inoxidable.
- El obturador de goma sintética.

- **Válvulas**

Las válvulas se emplearán para impedir o controlar el paso de fluido por la tubería. La elección de éstas se realizará en según la función que desempeñan y las condiciones extremas de funcionamiento de presión y temperatura. Los criterios de preferencia serán los siguientes:

- Para aislamiento: válvulas de esfera.
- Para equilibrado de circuitos: válvulas de asiento.
- Para vaciado: válvulas de esfera o de macho.
- Para llenado: válvulas de esfera.
- Para purga de aire: válvulas de esfera o de macho.
- Para seguridad: válvulas de resorte.
- Para retención: válvulas de disco de doble compuerta, o de clapeta o especiales para sistemas de termosifón.

- **Sistemas de regulación y control**

El sistema de control asegurará el correcto funcionamiento de las instalaciones, procurando obtener un buen aprovechamiento de la energía solar captada y asegurando un uso adecuado de la energía auxiliar. Éste comprenderá el control de funcionamiento de los circuitos y los sistemas de protección y seguridad contra sobrecalentamientos, heladas, etc. Su función será actuar sobre el funcionamiento de:

- Bombas de circulación.
- Activación del sistema antiheladas.
- Control de temperatura máxima en el acumulador.

El sistema de control actuará de manera que las bombas estén paradas si la diferencia de temperaturas es menor de 2°C y que arranquen cuando la diferencia sea mayor de 7°C. Además, asegurará que no se alcancen en ningún instante temperaturas superiores a las máximas soportadas por los materiales, componentes y tratamientos de los circuitos. También asegurará que la temperatura del fluido de trabajo no descienda por debajo de una temperatura 3° C grados superior a la de congelación del fluido. Alternativamente al control diferencial, existen sistemas de control accionados en función de la radiación solar.

- **Sistemas convencionales de apoyo**

Los sistemas convencionales de apoyo aseguran la continuidad en el abastecimiento de la demanda térmica. Cubren la demanda en los casos en los que la radiación solar es escasa o la demanda es superior a la estimada.

Al diseñarlo, se hará en función de la aplicación de la instalación para que sea aprovechada lo máximo posible la energía extraída del campo de captación solar, funcionando sólo cuando sea necesario.

Para pequeñas cargas de consumo se recomienda usar un sistema de energía auxiliar en línea, siendo idóneos los sistemas de gas modulantes en temperatura. Sin embargo, para medianas y grandes cargas de consumo, se tendrán sistemas de acumulación o semiacumulación siendo el sistema auxiliar generalmente una caldera de calefacción. En cambio, para cualquiera de los dos casos, el acumulador solar siempre ha de estar en serie.

No está permitida la conexión de un sistema auxiliar en el acumulador solar, ya que esto puede suponer una disminución de las posibilidades de la instalación solar para proporcionar las prestaciones energéticas que se pretenden obtener con este tipo de instalaciones.

3. MÉTODOS DE CÁLCULO

3.1. Introducción

En este capítulo del documento se desarrollarán los diferentes métodos de cálculo empleados para la realización del proyecto. Éstos serán: el método en base horaria utilizando el programa TRNSYS, el método f-Chart y el programa CHEQ4.

En primer lugar, se describirá el programa TRNSYS y su uso para este tipo de instalaciones solares. A continuación, se detallarán todas las ecuaciones y la metodología usada en el f-Chart. Y por último, se estudiará el uso del programa CHEQ4, una herramienta informática que ha sido diseñada por Aiguasol para el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, con el que será posible comprobar el cumplimiento de la contribución solar mínima de agua caliente sanitaria en las instalaciones solares térmicas.

3.2. Métodos en base horaria. TRNSYS.

TRNSYS (TRaNsient SYstem Simulator) fue desarrollado en el Solar Energy Laboratory de la Universidad de Wisconsin (EEUU). Consiste en un programa de simulación de sistemas termoenergéticos en régimen transitorio. TRNSYS adopta una estructura modular que fue diseñada para la resolución de sistemas complejos, donde cada uno de los componentes se describe mediante subrutinas más simples, denominadas según su nomenclatura como TYPE. De esta forma, el programa permite analizar un sistema entero como la suma de componentes o sistemas individuales y la interconexión entre éstos. Consiste en abordar la resolución de pequeños problemas en vez de un gran problema. Cada TYPE o subrutina contiene uno o varios modelos de un componente del sistema. Especificando los parámetros y las variables de entrada, el modelo calcula las variables de salida dependientes del tiempo. Estos valores de salida calculados pueden ser usados como variables de entrada para otros modelos.

Para generar un proyecto en TRNSYS se conectan gráficamente los componentes del sistema (TYPEs) en la interfaz visual Simulation Studio. Cada uno de los TYPEs se describe con un modelo

matemático mediante lenguaje de programación Fortran y lleva asociado una Proforma en el Simulation Studio. Éste describe el componente como una caja negra por medio de entradas, salidas y parámetros.

Además de los TYPEs estándar que se encuentran en la librería de TRNSYS, pueden crearse componentes nuevos y mejorados, de una forma sencilla. Esto resulta de gran interés en este proyecto dadas las limitaciones que presentan los componentes estándar del software. Además, una vez modelado el sistema, se pueden hacer análisis de sensibilidad de cada una de las variables que intervienen en el modelo, de una forma cómoda y relativamente sencilla.

TRNSYS es un solucionador de ecuaciones algebraicas y diferenciales que incorpora una librería con los más comunes sistemas termoenergéticos, diseñado especialmente para simulaciones transitorias. La primera versión data de 1975. En Octubre de 2004 se lanzó la versión 16, y actualmente ya se encuentra en el mercado la versión 17. Además, TRNSYS cuenta con varios desarrolladores en diversos países.

La naturaleza modular de TRNSYS permite incorporar nuevos modelos matemáticos al programa. Ya que los modelos de los componentes están escritos en Fortran, el usuario puede fácilmente modificarlos y generar nuevos componentes para tecnologías no incluidas en la librería standard. Distintos usuarios pueden compartir estos modelos sin necesidad de recompilar el programa gracias a la tecnología DLL. Sobre el archivo de entrada se pueden implementar estrategias sencillas de control de componentes u operaciones de pre o post procesamiento.

La librería TRNSYS incluye la mayoría de componentes comúnmente encontrados en los sistemas termoenergéticos y eléctricos: sistemas solares térmicos y fotovoltaicos, aplicaciones para edificios de bajo consumo energético, sistemas HVAC, cogeneración, sistemas de hidrógeno (células de combustible). También incluye rutinas de gestión de datos climáticos. El ejecutable de TRNSYS resuelve los componentes del sistema e itera para cada paso de tiempo hasta que todas las variables convergen. Las simulaciones son de carácter transitorio y pueden realizarse en los rangos de espacios de tiempo especificados por el usuario: desde varias horas hasta varios segundos, dependiendo del tipo de proceso que requiera ser estudiado.

3.2.1. Aproximación en el modelado de componentes

Cada TYPE o subrutina contiene uno o varios modelos de un componente de sistema. Especificando los parámetros (valores independientes del tiempo) y las variables de entrada (valores dependientes del tiempo), el modelo calcula las variables de salida dependientes del tiempo. Estos valores de salida calculados pueden ser usados como variables de entrada para otros modelos. La aproximación al modelado es del tipo “tradicional”, ya que cada subrutina de TRNSYS modela y resuelve un sub-problema concreto, implementando en cada caso un método de resolución específico y a medida del problema. Dependiendo de la complejidad del sub-problema que representa el modelo, el código de los TYPEs de TRNSYS puede llegar a ser tan extenso y complejo que bien pudiera ser un programa de simulación en sí mismo.

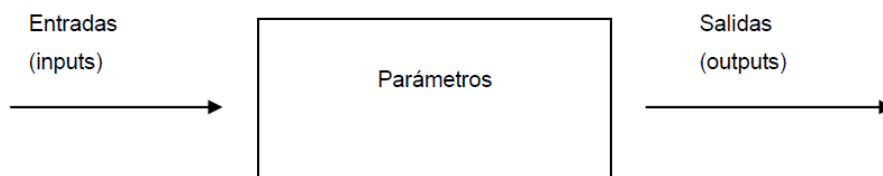


Figura 3.1: Esquema de concepto de modelo en TRNSYS.

3.2.2. Componentes de la librería estándar de TRNSYS

A continuación se especificarán los componentes de la librería de TRNSYS. En esta clasificación se podrán dividir en controladores, componentes eléctricos, intercambiadores, calentamiento y enfriamiento auxiliar (HVAC), sistemas de hidrógeno, componentes hidráulicos, cálculo de cargas en edificios, fenómenos físicos, sistemas de energía solar, sistemas de almacenamiento térmico, utilidades y lectura y procedimiento de datos.

- **Controladores**

| | |
|---------|---|
| TYPE 2 | Controlador diferencial ON/OFF con histéresis |
| TYPE 8 | Termostato de tres etapas |
| TYPE 22 | Controlador tipo iterativo con realimentación |

| | |
|----------|----------------------------------|
| TYPE 23 | Controlador PI |
| TYPE 40 | Controlador tipo microprocesador |
| TYPE 108 | Termostato de cinco etapas |

Tabla 3.1: Controladores de TRNSYS.

- **Componentes eléctricos**

| | |
|----------|---|
| TYPE 47 | Batería |
| TYPE 48 | Regulador-inversor |
| TYPE 50 | Suplemento comportamiento térmico de panel fotovoltaico |
| TYPE 90 | Turbina eólica |
| TYPE 94 | Campo de captadores fotovoltaicos |
| TYPE 102 | Controlador del gradiente: n° de motores requeridos según la carga |
| TYPE 120 | Conjunto del motor de generación Diesel |
| TYPE 175 | Unidad de acondicionamiento de potencia |
| TYPE 180 | Campo de captadores fotovoltaicos (con archivo de datos) |
| TYPE 185 | Batería de plomo-ácido considerando efectos del gas |
| TYPE 188 | Balance entre energía renovable, sistema de hidrógeno y red eléctrica |
| TYPE 194 | Campo de captadores fotovoltaicos |

Tabla 3.2: Componentes eléctricos de TRNSYS.

- **Intercambiadores**

| | |
|---------|---|
| TYPE 5 | Intercambiador |
| TYPE 17 | Recuperadores de calor residual |
| TYPE 91 | Intercambiador de efectividad constante |

Tabla 3.3: Componentes intercambiadores de TRNSYS.

- **Calentamiento y enfriamiento auxiliar (HVAC)**

| | |
|---------|---|
| TYPE 6 | Calentador Auxiliar ON/OFF |
| TYPE 20 | Bomba de calor con fuente de calor doble |
| TYPE 32 | Batería de frío |
| TYPE 42 | Equipamiento de aire acondicionado genérico |
| TYPE 43 | Rendimiento a carga parcial |
| TYPE 51 | Torre de enfriamiento evaporativo |
| TYPE 52 | Batería de frío detallada |
| TYPE 53 | Enfriadores de agua en paralelo |

| | |
|----------|--|
| TYPE 92 | Enfriador Auxiliar ON/OFF |
| TYPE 107 | Enfriadora de absorción de simple efecto |
| TYPE 121 | Calentador simple de aire |

Tabla 3.4: Componentes calentamiento y enfriamiento auxiliar de TRNSYS.

- **Sistemas de hidrógeno**

| | |
|----------|--|
| TYPE 100 | Controlador de electrolizador |
| TYPE 105 | Controlador maestro para sistemas de energía autónomos |
| TYPE 160 | Electrolizador avanzado alcalino |
| TYPE 164 | Depósito de gas comprimido |
| TYPE 170 | Compresor multi-etapa |
| TYPE 173 | Pilas de combustible alcalinas |

Tabla 3.5: Componentes sistemas de hidrógeno de TRNSYS.

- **Componentes hidráulicos**

| | |
|----------|---|
| TYPE 3 | Bomba de veloc. variable o ventilador de aire sin efecto de humedad |
| TYPE 11 | Pieza en T o válvula de tres vías |
| TYPE 13 | Válvula de sobrepresión |
| TYPE 31 | Tubería o conducto |
| TYPE 110 | Bomba de velocidad variable |
| TYPE 111 | Ventilador de aire de velocidad variable con efectos de humedad |
| TYPE 112 | Ventilador de aire de velocidad fija con efectos de humedad |
| TYPE 114 | Bomba de velocidad constante |

Tabla 3.6: Componentes hidráulicos de TRNSYS.

- **Cálculo de cargas en edificios**

| | |
|---------|--|
| TYPE 12 | Modelo estacionario de una zona |
| TYPE 88 | Modelo de zona única considerando la capacitancia del conjunto |
| TYPE 19 | Modelo de zona única detallado, pero sin interfaz gráfica |
| TYPE 56 | Modelo multizona detallado, con interfaz gráfica TRNBuild |

Tabla 3.7: Componentes cálculo de cargas en edificios de TRNSYS.

- **Fenómenos físicos**

| | |
|---------|--|
| TYPE 16 | Procesador de radiación |
| TYPE 30 | Sombra en campo de captadores |
| TYPE 33 | Psicrométrico |
| TYPE 54 | Generador de datos meteorológicos horarios a partir de mensuales |
| TYPE 58 | Propiedades de refrigerantes |

Tabla 3.8: Componentes fenómenos físicos de TRNSYS.

- **Sistemas de Energía Solar**

| | |
|---------|--|
| TYPE 1 | Colector solar plano (curva cuadrática de eficiencia) |
| TYPE 45 | Sistema solar por termosifón que integra captador y depósito |
| TYPE 71 | Captador de tubos de vacío |
| TYPE 72 | Captador solar modelado a partir de un archivo de datos |
| TYPE 73 | Captador solar plano (modelo teórico convencional Hottel-Whillier) |
| TYPE 74 | Captador solar parabólico de concentración |

Tabla 3.9: Componentes sistemas de energía solar de TRNSYS.

- **Sistemas de almacenamiento térmico**

| | |
|---------|--|
| TYPE 4 | Modelo multinodo para depósito de fluido estratificado. Aproximación multinodo (incluye 2 calentadores internos opcionales) |
| TYPE 60 | Modelo detallado para depósito de fluido estratificado con aproximación multinodo (incluye 2 calentadores internos opcionales) |
| TYPE 10 | Almacenamiento en lecho de rocas |
| TYPE 38 | Depósito estratificado (aproximación por flujo conectado “plug flow”) |
| TYPE 39 | Depósito de volumen variable (modela como depósito mezclado) |

Tabla 3.10: Componentes sistemas de almacenamiento térmico de TRNSYS.

- **Utilidades**

| Lectores de datos | |
|-------------------|--|
| TYPE 9 | Lector de datos |
| TYPE 89 | Lector de archivos estándar meteorológicos (TMY, TRNSYS TMY, TMY2, IWEC, EPW, CWC) |

| Funciones o perfiles | |
|---------------------------|--|
| TYPE 14 | Perfiles dependientes del tiempo |
| TYPE 41 | Planificador de perfiles de carga |
| TYPE 95 | Calculo de vacaciones |
| TYPE 96 | Procesador de perfiles aplicando el calendario |
| Enlaces a otros programas | |
| TYPE 62 | Enlace a Microsoft Excel |
| TYPE 66 | Enlace a EES |
| TYPE 97 | Enlace a CONTAM |
| TYPE 156 | Enlace a Matlab |
| TYPE 157 | Enlace a COMIS |
| Integradores | |
| TYPE 24 | Integral |
| TYPE 50 | Suma |
| Funciones especializadas | |
| TYPE 57 | Conversor de unidades |

Tabla 3.11: Componentes utilidades de TRNSYS.

- **Lectura y procesamiento de datos**

| | |
|----------|--|
| TYPE 15 | Procesador de datos meteorológicos con formatos estándar |
| TYPE 109 | Procesador de datos meteorológicos con formatos libre |

Tabla 3.12: Componentes lectura y procesamiento de datos.

3.2.3. Creación de sistemas complejos

El usuario debe crear para simular un sistema un fichero de entrada para el ejecutable de TRNSYS que consiste en una descripción de los componentes que constituyen el sistema y sus interconexiones. Las subrutinas o TYPEs de TRNSYS se pueden ver como cajas negras que necesitan dos tipos de información para funcionar: los parámetros del componente en sí y las variables de entrada. Algunas de las variables de entrada de un componente pueden ser variables de salida de otro componente del sistema, formando un “diagrama de flujo de información” que representa las interacciones (flujo de fluidos, de radiación, de señales de control, etc.) que aparecen en el sistema físico. Por tanto, también se deben definir las conexiones entre variables de salida de un componente y variables de entrada de otro componente.

3.2.4. Escalas de tiempo contempladas

Las simulaciones pueden realizarse con un paso de tiempo especificado por el usuario: desde varias horas hasta varios segundos, dependiendo del tipo de proceso que requiera ser estudiado. El paso de tiempo elegido es único para todos los componentes, no es posible definir diversos pasos de tiempo en una misma simulación. Sin embargo, en algunos componentes se adopta la solución de definir un paso de tiempo interno adaptado a las necesidades del sub-problema representado.

Para calcular las prestaciones de una instalación a lo largo de un año, se divide el año en periodos de tiempos iguales y se resuelve el estado del sistema (temperaturas, flujos, señales de control, etc.) en cada intervalo. El paso de tiempo es la duración de estos intervalos y define la resolución temporal de la simulación.

3.2.5. El motor de cálculo de TRNSYS

TRNSYS ofrece un método de sustitución sucesiva. El usuario debe elegir el paso de simulación (Δt , constante) y los instantes inicial (t_0) y final (t_f) de simulación. Con esta información se discretiza el dominio del tiempo según una malla de paso constante.

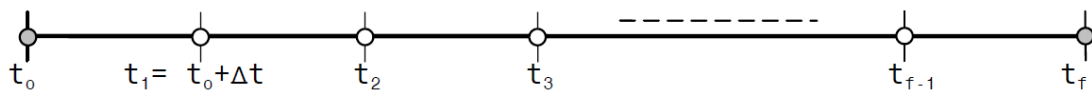


Ilustración 3.1: Discretización del periodo de simulación con paso de tiempo Δt constante y múltiplo entero de $t_f - t_0$

La evolución en tiempo tiene lugar a saltos entre nodos consecutivos de la malla. A partir de las condiciones de contorno de problema, conocidas en todo momento, el solucionador llama secuencialmente a cada componente, con los valores de entrada calculados en esa iteración y después comprueba la convergencia de las salidas dentro de la tolerancia especificada por el usuario. Si en una iteración se detecta que las salidas convergen, se da por buena su solución y se avanza en tiempo al siguiente paso, volviendo a repetirse el proceso. Si tras un número especificado de iteraciones no hubiera convergencia en los valores de salida, se salta

directamente al siguiente paso. Si esta circunstancia se repite más de un cierto número definido de veces, la simulación se detiene con un mensaje de error.

Es importante tener en cuenta que los valores de entrada que se generan en las iteraciones son tentativos, salvo el último de ellos (cuando el esquema ha convergido). Esto significa que hay que guardar memoria de los valores de las variables diferenciales en las condiciones iniciales del paso, a fin de no machacarlos con estos intermedios. Para facilitar la convergencia de un esquema, es necesario tener en cuenta el orden en que el programa invoca a cada componente (unidad) durante el proceso de iteración. Ese orden secuencial lo especifica el usuario, que debe hacerlo según un orden lógico, por ejemplo tratar de seguir el trayecto de los fluidos y de la radiación, llamar primero a los componentes que leen desde ficheros de texto las condiciones de contorno del paso, etc.

3.2.6. Aplicaciones de TRNSYS

TRNSYS tiene un amplio abanico de usuarios en todo el mundo, investigadores, consultores energéticos, ingenieros, expertos en simulación de edificios, estudiantes o arquitectos. Por esta diversidad de usuarios, la larga historia de la herramienta y su flexibilidad inherente, TRNSYS se utiliza en:

- Simulación de edificios.
- Sistemas solares térmicos.
- Sistemas solares fotovoltaicos.
- Edificios de baja energía.
- Sistemas HVAC.
- Plantas biomasa, cogeneración y trigeneración.
- Simulación de procesos de transferencia de calor con el suelo.
- Aplicaciones solares de alta temperatura.
- Bombas de calor geotérmicas.

- Simulación de varias zonas térmicas acopladas/ modelado de flujo de aire.
- Optimización de sistemas energéticos.
- Investigación y desarrollo en sistemas de producción y distribución energética.
- Evaluación de Tecnologías Emergentes.
- Pilas de combustible.
- Eólica.
- Calibración de modelos de edificios y sistemas con datos reales de operación.

3.3. Método f-Chart

3.3.1. Introducción

El método f-Chart ofrece una estimación de la fracción total de calor que deberá ser aportada por energía solar que es obtenida del sistema solar. Fue desarrollado por Sandfor Klein de la Universidad de Wisconsin en 1976.

La variable de diseño primaria es el área del captador; las variables secundarias son el tipo de captador, la capacidad de almacenaje, los caudales del flujo, y la carga y tamaño del intercambiador de calor. El método es una correlación procedente de cientos resultados de simulaciones del funcionamiento térmico de los sistemas solares térmicos. Las condiciones de las simulaciones fueron variadas en unos rangos apropiados de los parámetros de los diseños prácticos de sistemas. El resultado de las correlaciones será f , la fracción de la carga de calor mensual (para calefacción y agua caliente) administrada por la energía solar como una función de dos parámetros adimensionales. Uno es relacionado con las pérdidas de carga de calor del captador, y el otro está relacionado con la radiación solar absorbida para las cargas de calor.

F-chart ha sido desarrollado por tres configuraciones de sistemas estándar, sistemas líquidos y de aire para calefacción (y agua caliente) y sistemas para sólo servicio de agua. Un diagrama esquemático de un sistema de calor estándar usando un fluido calefactor se muestra en la figura 3.2. Este sistema normalmente utiliza una solución anticongelante en el circuito del colector y agua como

medio de almacenamiento. Los captadores pueden agotarse cuando la energía no sea captada, en ese caso el agua se usa directamente en los colectores y no se necesita de intercambiador de calor. Un intercambiador de agua-aire se usa para transferir el calor del tanque de almacenamiento para el subsistema de agua caliente sanitaria (ACS).

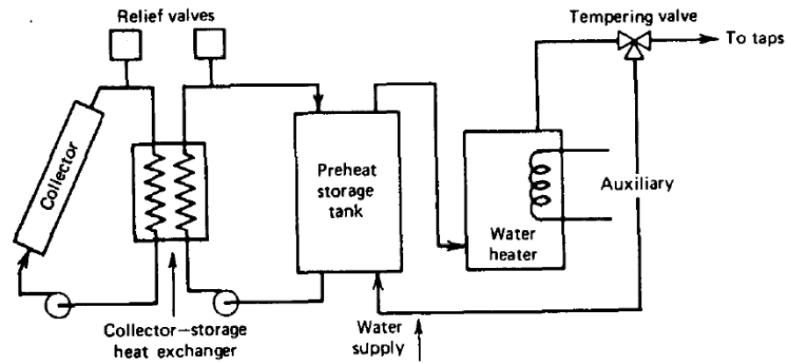


Figura 3.2: Esquema estándar de sistema solar térmico para el calentamiento de agua.

3.3.2. Alcance del método

La principal ventaja de este método es que es relativamente sencillo, y es posible incorporarlo en una hoja de cálculo pese a no tener excesivos conocimientos de informática o incluso energía solar térmica. Pese a ello, cuenta con algunas limitaciones, de entre las más importantes:

- Es válido únicamente para una configuración de sistema solar térmico.
- No incorpora el coeficiente de pérdidas de segundo orden del captador.
- El rango de aplicación está limitado, en principio, a un consumo de unos 560 kg/día.
- No contempla que el captador o acumulador solar alcancen su temperatura máxima.
- No contempla el circuito de distribución de la instalación.

3.3.3. Desarrollo del método

La potencia útil recibida en el captador se puede expresar de dos formas diferentes. La primera forma se puede calcular como la potencia absorbida debido a la radiación solar incidente menos las pérdidas provocadas por el flujo de calor en el ambiente, tal y como muestra la ecuación (3.1). La segunda forma será la mostrada en la ecuación (3.2), sería expresar la potencia útil como la energía absorbida por el fluido de trabajo en cada instante de tiempo, considerando el caudal del mismo y el salto de temperaturas experimentado.

$$\dot{Q}_u = F_R A [H_T(\tau\alpha) - U_L(T_{fe} - T_a)] \quad (3.1)$$

$$\dot{Q}_u = \dot{m} C_p (T_{fs} - T_{fe}) \quad (3.2)$$

Se define el factor de evacuación como la ganancia total del captador entre la ganancia del captador si todo el fluido estuviese a la temperatura de entrada durante todo el intercambio. Este factor es utilizado para facilitar la estimación del comportamiento de este tipo de equipos y es un dato característico del mismo. Se encuentra definido en por la expresión (3.3).

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p (T_{fs} - T_{fe})}{A [H_T(\tau\alpha) - U_L(T_{fe} - T_a)]} \quad (3.3)$$

La demanda total y energía total aportada siguen las ecuaciones (3.4) y (3.5) y consiste en la integración a través de un intervalo de tiempo de la suma de sus componentes para calefacción o ACS.

$$L = \int_{\Delta t} (Q_L + Q_W) dt \quad (3.4)$$

A continuación, se define la fracción de demanda cubierta como el total de la energía aportada por medios solares entre el total de energía demandada en un período de tiempo. Se considera que la totalidad de la demanda es cubierta, siendo la cantidad de energía restante aportada por medios auxiliares. La ecuación (3.5) es la resultante de combinar la definición de la fracción de demanda cubierta con la expresión de calor útil aportado por el captador solar.

$$f = \frac{L - E}{L} = \frac{\int_{\Delta t} \dot{Q}_u dt}{L} = \frac{F'_R A}{L} \int_{\Delta t} [H_T(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)] dt \quad (3.5)$$

Si se introduce un término adimensional denominado Z de tal forma que f se exprese en función de este factor. Éste seguirá la expresión (3.6).

$$Z = \frac{(T - T_a)}{(T_{ref9} - T_a)} \quad (3.6)$$

Combinando las dos ecuaciones (3.5) y (3.6) se obtendrá la (3.7).

$$f = \frac{F'_R A}{L} \int_{\Delta t} [H_T(\tau\alpha) - U_L(T_{ref} - T_a)Z] dt \quad (3.7)$$

La expresión (3.7) no se podrá utilizar directamente para determinar f debido a la función Z es una función complicada dependiente de la demanda, la radiación incidente y la temperatura ambiental y la integral no se puede evaluar explícitamente. En cambio de esta expresión se puede inferir la que el valor de f esta relacionado con los parámetros adimensionales (3.8) y (3.9), en los que la primera expresión representa la ganancia de energía en el tiempo de estudio y el segundo término representa las pérdidas de energía.

$$\frac{F'_R A}{L} \int_{\Delta t} H_T(\tau\alpha) dt = \frac{F'_R A}{L} S(\overline{\tau\alpha}) \quad (3.8)$$

$$\frac{F'_R A}{L} \int_{\Delta t} U_L (T_{ref} - T_a) dt = \frac{F'_R A}{L} U_L (T_{ref} - \bar{T}_a) \Delta t \quad (3.9)$$

El método F-Chart utiliza estos valores, adaptados para períodos mensuales, como forma de cálculo del valor de la fracción de demanda cubierta de una localidad. Estos parámetros adimensionales son los denominados X e Y y son usados para ajustar una curva a los resultados obtenidos por las simulaciones.

$$X = \frac{AF'_R U_L (T_{ref} - \bar{T}_a) \Delta t}{L} \quad (3.10)$$

$$Y = \frac{AF'_R (\bar{\tau}\bar{\alpha}) \bar{H}_T N}{L} \quad (3.11)$$

Las ecuaciones (3.10) y (3.11) se pueden reescribir como:

$$X = F_R U_L \frac{F'_R}{F_R} (T_{ref} - \bar{T}_a) \Delta t \frac{A}{L} \quad (3.12)$$

$$Y = F_R (\tau\alpha)_n \frac{F'_R}{F_R} \frac{(\bar{\tau}\bar{\alpha})}{(\tau\alpha)_n} \bar{H}_T N \frac{A}{L} \quad (3.13)$$

Donde $F_R U_L$ y $F_R (\tau\alpha)_n$ se obtienen de un colector de ensayo. La relación $\frac{F'_R}{F_R}$ corrige la temperatura de varias gotas entre el colector y el tanque de almacenamiento.

Para sistemas de configuraciones como la mostrada en la figura 3.2, la fracción solar f se da en función de X e Y :

$$f = 1.029Y - 0.065X - 0.245Y^2 + 0.0018X^2 + 0.0215Y^3 \quad (3.14)$$

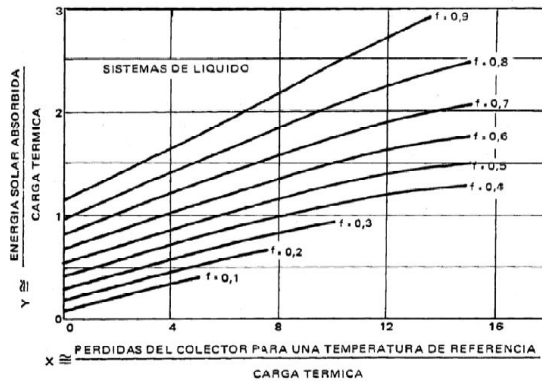


Figura 3.3: Curvas f para sistemas de líquidos.

El método original incluye la corrección de estos parámetros adimensionales por dos factores: diferentes valores de volumen de acumulación por metro cuadrado de acumulación y corrección por un consumo de agua caliente sanitaria superior al 20% de la demanda de calefacción.

- **Corrección por la capacidad de almacenamiento**

El funcionamiento anual del Sistema es relativamente insensible a la capacidad de almacenamiento si la capacidad es mas de aproximadamente 50 litros de agua por metro cuadrado del captador. Cuando se considera el coste del almacenamiento, hay un rango óptimo de 50 a 200 litros de agua por metros cuadrados del colector.

F-Chart fue desarrollado para una capacidad de almacenamiento estándar de 75 litros de agua almacenada por metro cuadrado del área del colector. El funcionamiento de los sistemas con capacidades de almacenamiento en el rango de 37.5 a 300 litros/m² puede ser determinados multiplicando por un grupo adimensional de X con un factor corrector del tamaño de almacenamiento $\frac{X_c}{X}$ de la figura 3.4. o ecuación (3.15).

$$\frac{X_c}{X} = \left(\frac{\text{Capacidad de almacenamiento actual}}{\text{Capacidad de almacenamiento estándar}} \right)^{-0.25} \quad (3.15)$$

Para $0.5 \leq \left(\frac{\text{Capacidad de almacenamiento actual}}{\text{Capacidad de almacenamiento estándar}} \right) \leq 4.0$

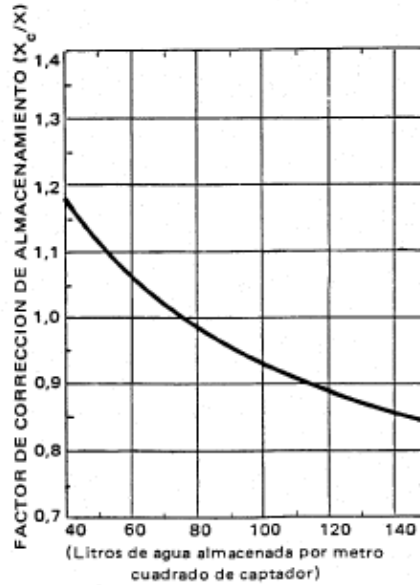


Figura 3.4: Factor de corrección por almacenamiento.

- **Corrección por consumo de ACS**

El método se desarrolló para instalaciones donde la demanda de ACS es inferior al 20% de la demanda de calefacción. Si este porcentaje es superior, se corrige el factor de pérdidas adimensional X mediante la ecuación:

$$\frac{X_c}{X} = \frac{11,6 + 1,18T_{ac} + 3,86T_{af} - 2,32T_{am}}{(100 - T_{am})} \quad (3.16)$$

3.4. Método Metasol (CHEQ4)

CHEQ4 es una herramienta que tiene como fin validar el cumplimiento de la contribución solar mínima de agua caliente sanitaria en instalaciones solares térmicas, determinado conforme a la sección del Código Técnico de la Edificación.

Este programa informático ha sido desarrollado por Aguasol para el IDAE (Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía) y ASIT (Asociación Solar de la Industria Térmica), que permite verificar y comprobar rápidamente el correcto dimensionado de las instalaciones solares, siempre que éstas queden suficientemente representadas dentro de su ámbito de aplicación.

CHEQ4 no se trata de una herramienta de diseño, ya que su correcta aplicación acredita el cumplimiento, desde el punto de vista energético, de los requisitos establecidos en la sección HE4. Si por el contrario no cumple la contribución solar mínima mediante este procedimiento, no invalida la posibilidad de demostrar su cumplimiento mediante otros procedimientos.

3.4.1. Metodología de cálculo

CHEQ4 utiliza MetaSol como metodología de cálculo que combina la simulación dinámica de programas como TRANSOL con métodos estáticos como F-Chart, manteniendo presente las características del mercado español y la normativa aplicable.

MetaSol ha sido basada en curvas obtenidas a partir de más de 69.000 simulaciones dinámicas realizadas con TRNSYS, en base mensual con más de 800.000 datos. Las configuraciones empleadas en Cheq4 se han modelizado con TRNSYS en una multitud de escenarios con el fin de obtener 14 curvas para el cálculo de las ganancias y pérdidas de cada uno de los sistemas.

Esta metodología define 12 variables de entrada que fijan las condiciones de operación y propiedades del sistema, y tres factores de efectos aleatorios que caracterizan la localización (radiación, temperatura de agua de red y temperatura ambiente). Sin embargo, no todas de ellas tienen sentido definirlas en todos los esquemas, por lo que cada función está caracterizada por entre 6 y 10 variables y 2 o 3 factores climáticos.

La forma de las funciones es muy similar a las del método f-Chart, y la metodología será la siguiente: dada una localización, un consumo, una configuración y las características de los

componentes que forman el sistema, el proceso de cálculo constará de dos pasos:

1. Determinación de las variables de entrada F_i (climáticas) y A_i (propias del sistema).
2. Substitución de F_i y A_i en las funciones de resultados de la configuración escogida.

3.4.2. Entradas al programa

- **Localización**

En primer lugar, se deberá introducir en el programa la localización de la instalación (provincia y municipio) y la altura absoluta respecto al nivel del mar. A partir de esto, el programa obtendrá una tabla con la irradiación global media mensual sobre la horizontal, la temperatura diaria media mensual del agua de red y la temperatura ambiente diaria media mensual.

CHEQ4 Herramienta para la validación del cumplimiento del HE4 en instalaciones solares térmicas

Provincia: Sevilla Municipio: Sevilla Zona climática: Zona V Latitud: 37° 22'

Mapa provincia

Altura municipio seleccionado (m): 12

Altura de la instalación (m): 12

| | Rad(MJ/m2) | T.Red (°C) | T.Amb (°C) |
|------------|------------|------------|------------|
| Enero | 9.8 | 11.0 | 10.7 |
| Febrero | 13.2 | 11.0 | 11.9 |
| Marzo | 18.1 | 13.0 | 14.0 |
| Abril | 22.1 | 14.0 | 16.0 |
| Mayo | 25.2 | 16.0 | 19.6 |
| Junio | 28.4 | 19.0 | 23.4 |
| Julio | 29.2 | 21.0 | 26.8 |
| Agosto | 25.9 | 21.0 | 26.8 |
| Septiembre | 20.8 | 20.0 | 24.4 |
| Octubre | 14.5 | 16.0 | 19.5 |
| Noviembre | 10.5 | 13.0 | 14.3 |
| Diciembre | 8.4 | 11.0 | 11.1 |
| Promedio | 18.8 | 15.5 | 18.2 |

Localización, Configuración, Demanda, Solar/Apoyo, Otros parámetros, Resultados

Datos proyecto, Nuevo proyecto, Abrir proyecto, Guardar proyecto, Ayuda, Acerca de..., Salir

Figura 3.5: Pantalla de CHEQ4 localización.

- **Configuración**

Una vez especificada la localización de la instalación, se procede a seleccionar su configuración. Cheq4 cuenta con 8 configuraciones diferentes de instalaciones para agua caliente sanitaria. Estas configuraciones disponibles se encuentran divididas en dos grandes grupos según sean para consumo único o consumo múltiple.

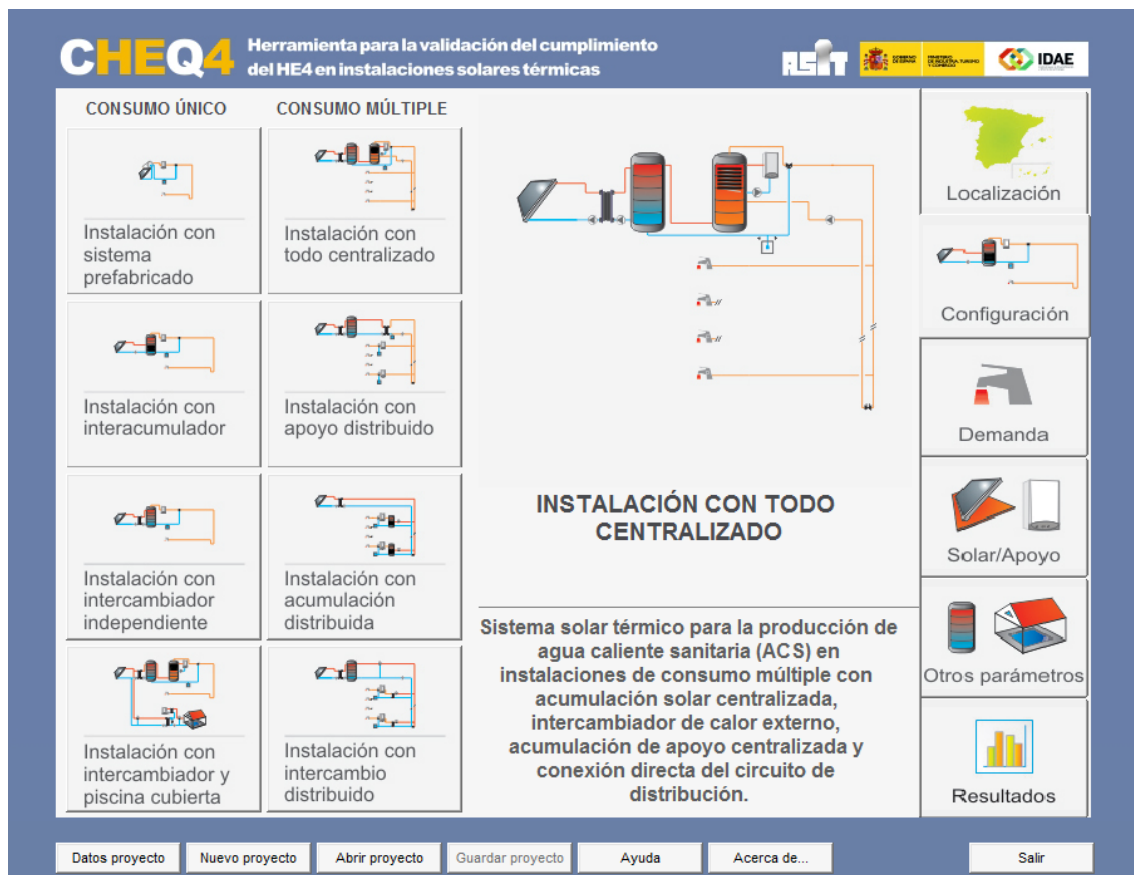


Figura 3.6: Pantalla de CHEQ4 configuración.

I. CONSUMO ÚNICO

i. Instalación con sistema prefabricado:

Sistema solar térmico prefabricado para la producción de agua caliente sanitaria (ACS) en instalaciones de consumo único con válvula termostática.

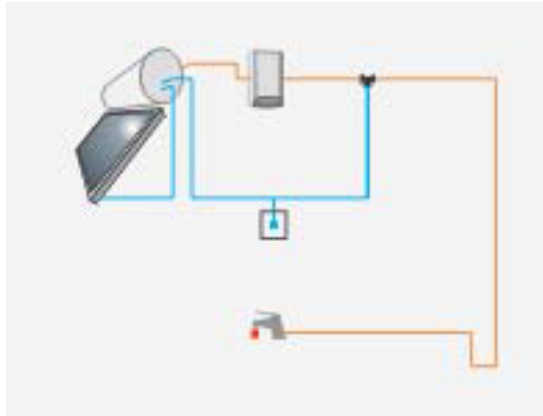


Figura 3.7: Instalación para consumo único con sistema prefabricado.

ii. Instalación con interacumulador:

Sistema solar térmico para la producción de agua caliente sanitaria (ACS) en instalaciones de consumo único con acumulador solar, intercambiador interno, sistema de apoyo conectado en serie y válvula termostática.

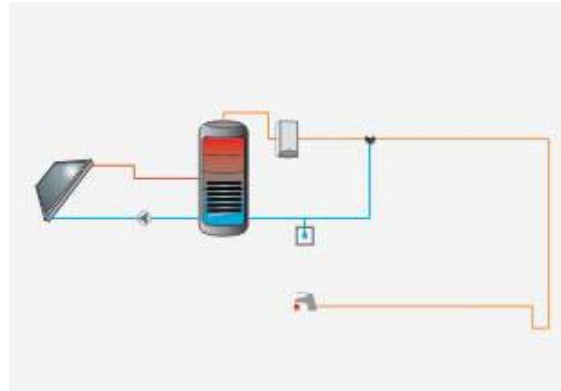


Figura 3.8: Instalación para consumo único con interacumulador.

iii. Instalación con intercambiador independiente

Sistema solar térmico para la producción de agua caliente sanitaria (ACS) en instalaciones de consumo único con acumulador solar, intercambiador externo, sistema de apoyo conectado en serie y válvula termostática.

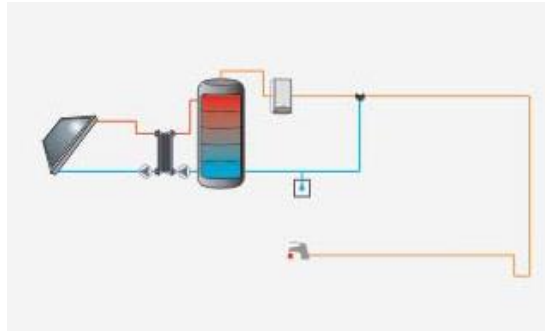


Figura 3.9: Instalación para consumo único con intercambiador independiente.

iv. Instalación con intercambiador independiente y piscina cubierta

Sistema solar térmico para la producción de agua caliente sanitaria (ACS) y el calentamiento de una piscina cubierta con intercambiadores de calor externos para ACS y piscina, acumulador solar y de apoyo centralizados, sistema de apoyo conectado con intercambiador interno o resistencia eléctrica y válvula termostática.

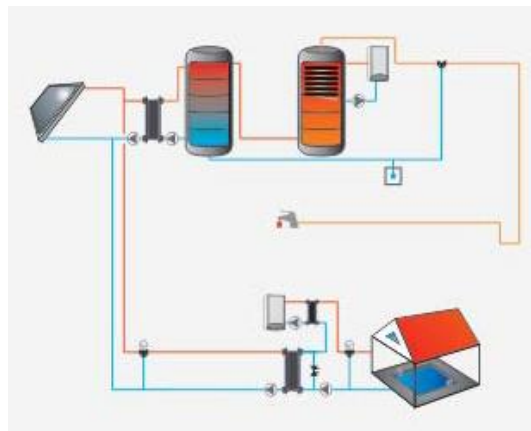


Figura 3.10: Instalación para consumo único con intercambiador independiente.

II. CONSUMO MÚLTIPLE

i. Instalación con todo centralizado

Sistema solar térmico para la producción de agua caliente sanitaria (ACS) en instalaciones de consumo múltiple con acumulación solar centralizada, intercambiador de calor externo, acumulación de apoyo centralizada, sistema de apoyo conectado con intercambiador interno o resistencia eléctrica

y conexión directa del circuito de distribución. Esta tipología de instalación también es válida para el cálculo de sistemas con interacumulador.

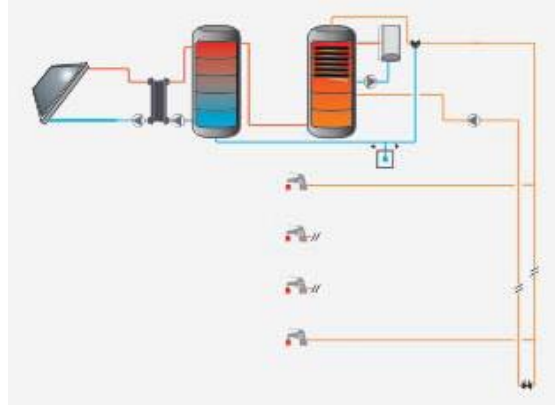


Figura 3.11: Instalación para consumo múltiple con todo centralizado.

ii. Instalación con acumulación centralizada y apoyo distribuido

Sistema solar térmico para la producción de agua caliente sanitaria (ACS) en instalaciones de consumo múltiple con acumulación solar centralizada e intercambiador de calor externo, intercambiador de calor centralizado para la preparación de ACS, sistemas de apoyo instantáneos en serie y válvulas termostáticas. Esta tipología de instalación también es válida para el cálculo de sistemas con circuito de distribución abierto. No obstante, se deberá prestar especial atención en el correcto diseño y dimensionado del circuito de distribución.

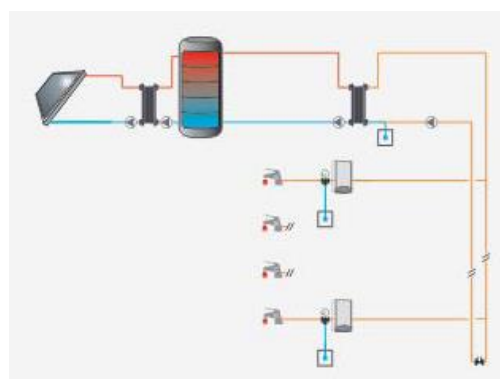


Figura 3.12: Instalación para consumo múltiple con acumulación centralizada y apoyo distribuido.

iii. Instalación con acumulación distribuida

Sistema solar térmico para la producción de agua caliente sanitaria (ACS) en instalaciones de consumo múltiple con acumuladores individuales, intercambiador de calor interno, sistemas de apoyo instantáneos en serie y válvulas termostáticas. En este tipo de instalaciones, es posible definir un sistema apoyo tipo “Termo eléctrico”, que consiste en un acumulador conectado en serie con una resistencia eléctrica en su interior.

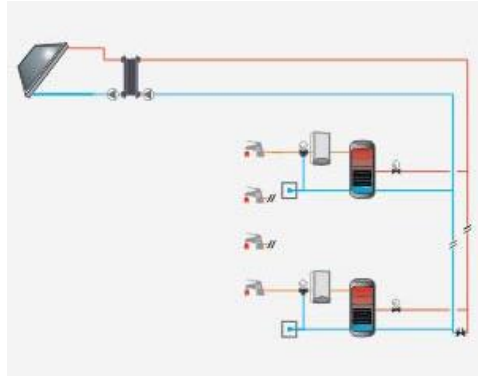


Figura 3.13: Instalación para consumo múltiple con acumulación distribuida.

iv. Instalación con intercambio distribuido.

Sistema solar térmico para la producción de agua caliente sanitaria (ACS) en instalaciones de consumo múltiple con acumulación solar centralizada e intercambiador de calor externo, con intercambiadores de consumo distribuido, sistemas de apoyo instantáneos en serie y válvulas termostáticas. En este tipo de instalaciones, es posible definir un sistema apoyo tipo “Termo eléctrico”, que consiste en un acumulador conectado en serie con una resistencia eléctrica en su interior.

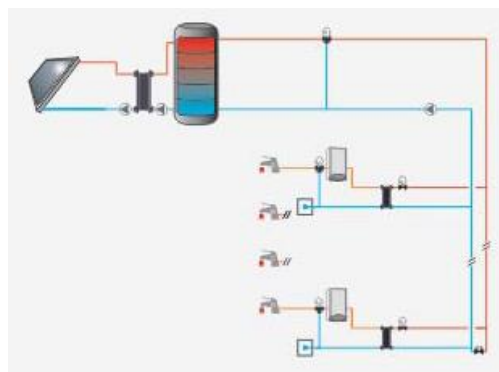


Figura 3.14: Instalación para consumo múltiple con intercambio distribuido.

- **Demanda**

En esta pestaña del programa, se deberá especificar la demanda total del agua caliente sanitaria del edificio. Se distinguen dos tipos de consumo: el consumo único y el consumo múltiple. La demanda en instalaciones de consumo único se calcula a partir del tipo de aplicación y del número de elementos de dicha aplicación. En cambio, si se requiere definir un consumo múltiple, se deberá especificar el número de viviendas y dormitorios. Cheq4 considera un consumo en viviendas unifamiliares de 28 l/día a 60°C por persona.

Además, en el apartado “Consumo total” es posible especificar otras demandas diarias, que no se hayan podido incluir en ninguno de los apartados anteriores. En el apartado “Ocupación estacional” es posible especificar el porcentaje mensual de la instalación.

Una vez introducida la demanda, Cheq4 es capaz de determinar cuál ha de ser el requerimiento de contribución solar mínima exigida por el HE4. Éste se mostrará en el apartado “Contribución solar mínima exigida” en función del sistema de apoyo que finalmente seleccione el usuario.

CHEQ4 Herramienta para la validación del cumplimiento del HE4 en instalaciones solares térmicas

CONSUMO ÚNICO

Aplicación:

Número de...:

Demanda calculada (l/día a 60 °C):

CONSUMO MÚLTIPLE

| | Viviendas | Dormitorios | Personas | Litros/día |
|--------|---------------------------------|--------------------------------|----------|------------|
| Tipo A | <input type="text" value="24"/> | <input type="text" value="3"/> | 96.0 | 2 285 |
| Tipo B | <input type="text" value="0"/> | <input type="text" value="0"/> | 0.0 | 0 |
| Tipo C | <input type="text" value="0"/> | <input type="text" value="0"/> | 0.0 | 0 |
| Tipo D | <input type="text" value="0"/> | <input type="text" value="0"/> | 0.0 | 0 |

Demanda calculada (l/día a 60 °C): 2 285

CONSUMO TOTAL

Otras demandas (l/día a 60°C):

Demanda total (l/día a 60°C): 2 285

OCUPACIÓN ESTACIONAL (%)

| Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic |
| 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

CONTRIBUCIÓN SOLAR MÍNIMA EXIGIDA

Localización

Configuración

Demanda

Solar/Apoyo

Otros parámetros

Resultados

Figura 3.15: Pantalla de CHEQ4 demanda.

- **Solar/Apoyo**

En el apartado “Solar/Apoyo” se debe especificar todos aquellos parámetros que son comunes a todos los tipos de configuraciones, que definen el sistema y que son necesarios para la metodología de cálculo MetaSol.

CHEQ4 Herramienta para la validación del cumplimiento del HE4 en instalaciones solares térmicas

CAPTADORES

Empresa: Fercfloor
 Marca/Modelo: FC 2.2M

AVISO:
 Verificar la existencia y vigencia de la certificación del captador seleccionado.

Datos de ensayo

| | |
|---------------|-----------|
| Área (m2) | 1.99 |
| n0 (-) | 0.788 |
| a1 (W/m2K) | 3.911 |
| a2 (W/m2K2) | 0.01 |
| Qtest(l/hm2) | 72 |
| k50 | 0.94 |
| Laboratorio | CENER |
| Certificación | NPS-16314 |

CAMPO DE CAPTADORES

Núm. captadores: 8 Captadores en serie: 1 Pérdidas sombras (%): 0
 Orientación (°): 0 Inclinación (°): 37 Área total captadores (m2): 15.92

CIRCUITO PRIMARIO / SECUNDARIO

Caudal prim.(l/h): 1 146 Anticongelante (%): 30 Long. circuito (m): 30
 Diám. tubería (mm): 17 Esp. aislante (mm): 30 Aislante: genérico

SISTEMA DE APOYO

Tipo de sistema: Caldera convencional
 Tipo de combustible: Gas natural

Localización
Configuración
Demanda
Solar/Apoyo
Otros parámetros
Resultados

Datos proyecto Nuevo proyecto Abrir proyecto Guardar proyecto Ayuda Acerca de... Salir

Figura 3.16: Pantalla de CHEQ4 solar/apoyo.

En primer lugar, se encontrará con un apartado denominado “Captadores” donde el usuario debe seleccionar el captador concreto que figure en el proyecto o que desea utilizar en su instalación. Cheq4 cuenta con una amplia base de datos con la mayoría de los captadores homologados que actualmente existen en el mercado. Para su selección, se tendrá que especificar la “Empresa” comercializadora del producto y su “Marca o Modelo”. Una vez seleccionado, se mostrarán los principales datos del captador seleccionado.

A continuación, se parametriza el campo de captadores. Para ellos, será necesario especificar los siguientes parámetros:

- Número de captadores que se han proyectado para la instalación solar térmica.
- Número de captadores en serie por los que tiene que circular el fluido caloportador.
- Pérdidas por sombreadamiento (%).
- Orientación (°) del campo de captadores respecto al eje norte-sur.
- Inclinación (°) del campo de captadores respecto de la horizontal.
- Área total de captadores (m^2).

El siguiente apartado es el denominado “Circuito primario/secundario”, en el cual definirán el circuito solar los parámetros descritos a continuación:

- Caudal del circuito primario o caudal de campo (l/h).
- Anticongelante (%) en el fluido caloportador.
- Longitud equivalente del circuito primario (m) incluyendo impulsión y retorno.
- Espesor (mm) y tipo de aislante utilizado.

Por último, se especifica el sistema de apoyo utilizado y el tipo de combustible empleado. Cheq4 cuenta con los siguientes tipos de sistema de apoyo y combustibles:

- Caldera convencional (gas natural, gasóleo o GLP).
- Caldera de condensación (gas natural, gasóleo o GLP).
- Caldera de biomasa (biomasa).
- Caldera eléctrica (electricidad).

- **Otros parámetros del sistema**

En la pestaña “Otros parámetros” el usuario debe especificar aquellos parámetros que son propios de cada configuración. Los campos no correspondientes al tipo de instalación seleccionada aparecerán inactivos y de color gris. El usuario debe introducir el volumen de acumulación, el de las subestaciones (si procede), todos los parámetros que definen el circuito de distribución y los datos de la piscina (si procede).

CHEQ4 Herramienta para la validación del cumplimiento del HE4 en instalaciones solares térmicas

VOLUMEN DE ACUMULACIÓN

Volumen total (l)

Vol/Área (l/m²) 50.25

DISTRIBUCIÓN

Long. circuito (m)

Diám. tubería (mm)

Esp. aislante (mm) T. imp.(°C)

Aislante

VOLUMEN ACUMULACIÓN SUBESTACIONES

Tipo A (l) Tipo C (l)

Tipo B (l) Tipo D (l)

Volumen total (l) 0 Vol/Área (l/m²)

DISTRIBUCIÓN SUBESTACIONES

Long. total (m)

Diám. tubería (mm)

Esp. aislante (mm)

Aislante

PISCINA CUBIERTA

Altura (m) Temp. ambiente (°C)

Apertura diaria (h) Temp. piscina (°C)

Superficie lámina (m²) Renov. volumen día (%)

Humedad relativa (%) Ocupación (pers/m²)

Sidebar:

- Localización
- Configuración
- Demanda
- Solar/Apoyo
- Otros parámetros
- Resultados

Botones: Datos proyecto, Nuevo proyecto, Abrir proyecto, Guardar proyecto, Ayuda, Acerca de..., Salir

Figura 3.17: Pantalla de CHEQ4 otros parámetros

- **Resultados**

La última pestaña de Cheq4 denominada “Resultados” corresponde al cálculo y visualización de los resultados. El programa calcula las ganancias y pérdidas de la instalación especificada siguiendo la metodología de cálculo MetaSol.

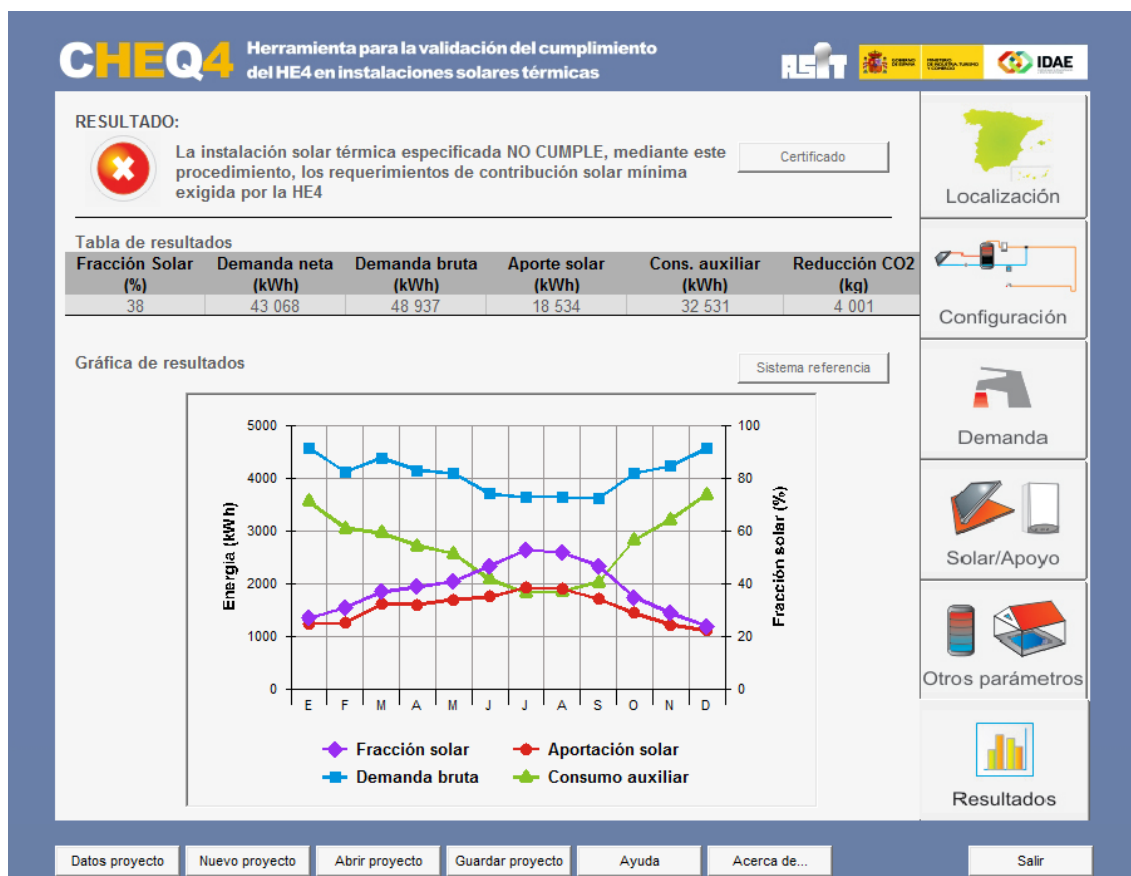


Figura 3.18: Pantalla de CHEQ4 resultados.

En el apartado “Tabla de resultado” se muestran los valores anuales de los siguientes indicadores y resultados:

- Fracción solar (%): Fracción entre los valores anuales de la energía solar aportada exigida y la demanda energética anual.
- Demanda neta (kWh): Demanda energética anual sin tener en cuenta las pérdidas en acumulación y en distribución.
- Demanda bruta (kWh): Demanda energética anual teniendo en cuenta las pérdidas en acumulación y en distribución.
- Aportación solar al sistema (kWh): Energía solar aportada por la instalación.
- Consumo de energía primaria auxiliar (kWh): Energía aportada por la instalación auxiliar de apoyo para satisfacer la demanda total.

- Reducción de las emisiones de CO₂ asociada a la utilización del sistema solar térmico (kg).

También se muestran gráficamente los valores mensuales de fracción solar, demanda bruta, fracción solar y consumo auxiliar.

3.4.3. Cálculo de pérdidas en CHEQ4

CHEQ4 a diferencia del método f-Chart, calcula las pérdidas de la instalación de agua caliente sanitaria. Por ello, en los sistemas centralizados, el programa diferencia la demanda total en demanda neta y demanda bruta, contando esta última con las pérdidas en acumulación y en distribución. En el caso de una instalación centralizada al poseer una trayecto de distribución de gran tamaño, tiene sentido que estas pérdidas no sean despreciadas. En cambio, si se tratara de una configuración distribuida, al ser la demanda única, la demanda neta y la demanda bruta tendrían el mismo valor. Para este último caso se despreciarían las pérdidas producidas desde el consumo auxiliar hasta los puntos de consumo debido al menor trayecto existente.

4. ESTUDIO DE CASOS

4.1. Introducción

Una vez descritos los métodos de cálculo que se van a emplear en el capítulo anterior, se describirán detalladamente las instalaciones que se van a simular. Se especificarán los parámetros de los equipos, las localidades y la disposición de los captadores. Al final del capítulo, se muestran los resultados obtenidos.

4.2. Descripción de casos

Para la descripción de los casos simulados, se procederá en primer lugar al desarrollo de un caso a modo de ejemplo. A este caso se le denominará caso de referencia. A partir de dicho caso, se variarán unos determinados parámetros hasta simular un total de 72 casos.

Se cuenta con un sistema solar térmico para la producción de agua caliente sanitaria en instalaciones de consumo múltiple con acumulación solar centralizada, intercambiador de calor externo, acumulación de apoyo centralizada y conexión directa del circuito de distribución.

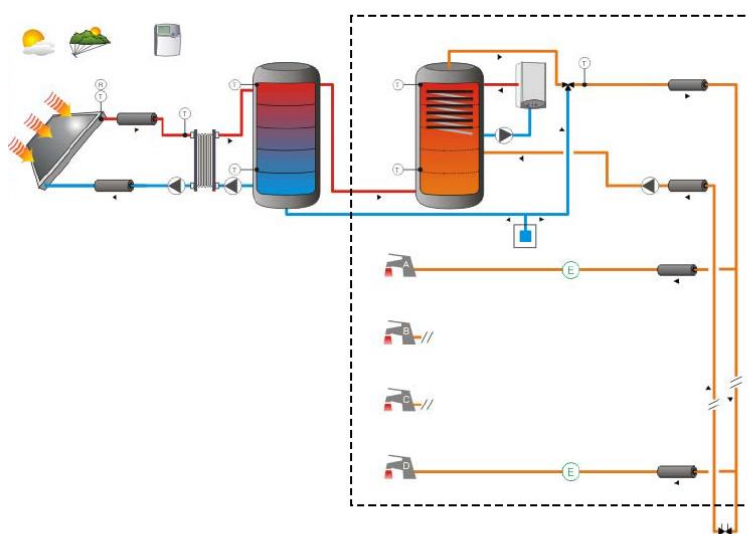


Figura 4.1: Instalación multifamiliar: todo centralizado.

La instalación solar se ubicará en Sevilla cuya zona climática es la zona V y la latitud es 37° 22. La altura de la instalación se tomará a la misma altura que el municipio. Esta localización contará con los datos de radiación, temperatura de red y temperatura ambiente diarias mensuales que se encuentran recogidos en la tabla 4.1.

| Mes | Rad (MJ/m ²) | T. Red (°C) | T. Amb (°C) |
|-------------------|--------------------------|-------------|-------------|
| Enero | 9,1 | 11 | 10,7 |
| Febrero | 12,2 | 11 | 11,9 |
| Marzo | 16,0 | 13 | 14,0 |
| Abril | 19,8 | 14 | 16,0 |
| Mayo | 24,1 | 16 | 19,6 |
| Junio | 25,9 | 19 | 23,4 |
| Julio | 27,2 | 21 | 26,8 |
| Agosto | 24,8 | 21 | 26,8 |
| Septiembre | 19,2 | 20 | 24,4 |
| Octubre | 14,3 | 16 | 19,5 |
| Noviembre | 10,2 | 13 | 14,3 |
| Diciembre | 8,3 | 11 | 11,1 |

Tabla 4.1: Datos meteorológicos.

La aplicación de la instalación solar será para 24 viviendas multifamiliares con un número de 3 dormitorios cada una, un total de 96 personas. Se tendrá como consumo unitario diario medio de agua caliente sanitaria el ofrecido en la sección HE4 para viviendas multifamiliares. Este valor será de 22 litros por persona/día asociado a una temperatura de referencia de 60°C. Esta demanda se considerará demanda neta debido a que no cuenta pérdidas en la distribución del agua caliente.

En cuanto al captador utilizado en el sistema solar térmico, será de la empresa Fercofloor, modelo FC 2.2M. Tendrá los datos de ensayo que se muestran en la tabla 4.2. Se tendrá una superficie de captación total de 16 m², posicionándose todos los captadores en paralelo con una orientación e inclinación de 0° y 37° respectivamente. Además, no se considerarán pérdidas por sombras.

| | |
|--|-------|
| Área (m²) | 1,99 |
| Eficiencia óptica del captador (-) | 0,788 |
| Coefficiente de pérdidas lineal (W/m²K) | 3,911 |
| Coefficiente de pérdida cuadrática (W/m²K²) | 0,01 |
| Caudal del captador en condiciones de diseño (Kg/hm²) | 72 |

Tabla 4.2: Datos de ensayo del captador solar.

En cuanto al circuito primario, se empleará un anticongelante del 30% de propilenglicol. La longitud del circuito será de 30 m y con un diámetro de 17 mm. Se utilizará un aislante genérico cuyo coeficiente lineal de pérdidas térmicas es de 0,043 W/mK con un espesor de 30 mm. Por este circuito circulará un caudal primario de 1146 l/h.

Se tendrá como sistema de apoyo una caldera convencional que utilizará como combustible gas natural.

Para el cálculo del volumen total del depósito de acumulación en cada caso de estudio se empleará el ratio acumulación/ área de absorbedor. Este ratio será de 0,05 m³/m².

A continuación se definirán el circuito de distribución y el de distribución a las subestaciones. El circuito de distribución contará con una longitud de 40 metros con un diámetro de tubería de 34,96 mm. En cuanto al circuito de distribución a las subestaciones tendrá 16 metros de longitud total y 20 mm de diámetro. Tanto para el circuito de distribución como para el de distribución a las subestaciones, se contará con el mismo tipo y espesor de aislante usado en el circuito primario.

Finalmente, la temperatura de impulsión en la distribución se ha seleccionado un valor de 55°C.

Una vez definido el caso de referencia, se variarán ciertos parámetros para contar con una gran variedad de casos de simulación. Para estos casos, además de usar Sevilla, se variará la ubicación de la instalación seleccionando también Bilbao y Madrid. Para estas tres localizaciones, se modificarán las áreas totales de captación para 16, 24, 32 y 40 m². Además para cada área, se simularán con

diferentes longitudes de distribución variando desde 0 a 50 m. Puesto que en los programas CHEQ4 y TRNSYS no se puede introducir longitudes de distribución nulas, se ha introducido para simular dichos casos una longitud igual a 0,01 m.

4.3. Estudio del caso de referencia.

En el estudio del caso de referencia, se simulará dicho caso primero en el programa CHEQ4. Una vez obtenidos los resultados, se pasará a determinar la fracción solar mediante el método f-Chart. Y por último, se utilizará el programa TRNSYS.

- **CHEQ4**

En el primer apartado de CHEQ4, se seleccionará como provincia y municipio de localización Sevilla. La altura de la instalación se proporciona por defecto la misma que la altura del municipio. El programa proporciona la zona climática, latitud y los datos meteorológicos mensuales de esta ubicación.

CHEQ4 Herramienta para la validación del cumplimiento del HE4 en instalaciones solares térmicas

Provincia: Sevilla Municipio: Sevilla Zona climática: Zona V Latitud: 37° 22'

Mapa provincia

Altura municipio seleccionado (m): 12

Altura de la instalación (m): 12

| | Rad (MJ/m2) | T.Red (°C) | T.Amb (°C) |
|------------|-------------|------------|------------|
| Enero | 9.8 | 11.0 | 10.7 |
| Febrero | 13.2 | 11.0 | 11.9 |
| Marzo | 18.1 | 13.0 | 14.0 |
| Abril | 22.1 | 14.0 | 16.0 |
| Mayo | 25.2 | 16.0 | 19.6 |
| Junio | 28.4 | 19.0 | 23.4 |
| Julio | 29.2 | 21.0 | 26.8 |
| Agosto | 25.9 | 21.0 | 26.8 |
| Septiembre | 20.8 | 20.0 | 24.4 |
| Octubre | 14.5 | 16.0 | 19.5 |
| Noviembre | 10.5 | 13.0 | 14.3 |
| Diciembre | 8.4 | 11.0 | 11.1 |
| Promedio | 18.8 | 15.5 | 18.2 |

Localización

Configuración

Demanda

Solar/Apoyo

Otros parámetros

Resultados

Figura 4.2: Pantalla CHEQ4 localización del caso de referencia.

En el siguiente apartado se seleccionará la instalación solar con todo centralizado. Al seleccionarla, ofrecerá un esquema de dicho sistema junto con una breve descripción tal como se muestra en la figura 4.3.



Figura 4.3: Pantalla CHEQ4 configuración del caso de referencia.

A continuación, se definirá la demanda neta que cuenta la instalación. Se seleccionará consumo múltiple siendo todas las viviendas multifamiliares del mismo tipo, tipo A. Se introducirán un total de 24 viviendas con 3 dormitorios. Al incluir dichos datos, el programa calcula el número de personas totales así como los litros/día a 60°C como referencia. Se tomará una ocupación estacional del 100% en todos los meses del año.

CHEQ4
Herramienta para la validación del cumplimiento del HE4 en instalaciones solares térmicas

CONSUMO ÚNICO

Aplicación

Número de...

Demanda calculada (l/día a 60 °C)

CONSUMO MÚLTIPLE

| | Viviendas | Dormitorios | Personas | Litros/día |
|-----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------|------------|
| Tipo A | <input type="text" value="24"/> | <input type="text" value="3"/> | 96.0 | 2 285 |
| Tipo B | <input type="text" value="0"/> | <input type="text" value="0"/> | 0.0 | 0 |
| Tipo C | <input type="text" value="0"/> | <input type="text" value="0"/> | 0.0 | 0 |
| Tipo D | <input type="text" value="0"/> | <input type="text" value="0"/> | 0.0 | 0 |
| Demanda calculada (l/día a 60 °C) | | | 2 285 | |

CONSUMO TOTAL

Otras demandas (l/día a 60°C)

Demanda total (l/día a 60°C) 2 285

OCUPACIÓN ESTACIONAL (%)

| Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic |
| 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

CONTRIBUCIÓN SOLAR MÍNIMA EXIGIDA

Caso general FS 60%

Caso piscina FS 70%

Localización

Configuración

Demanda

Solar/Apoyo

Otros parámetros

Resultados

Figura 4.4: Pantalla CHEQ4 demanda del caso de referencia.

En el siguiente apartado, se seleccionará el tipo de captador que ha sido comentado anteriormente. CHEQ4 da un aviso para verificar la existencia y vigencia de la certificación del captador seleccionado. Una vez introducido el captador, se pasará a definir el campo de captadores. Para ello, al contar con un área total de captación de 16 m², se tendrán 8 captadores en serie. Éstos, como se ha explicado en el apartado anterior del documento, tendrán una orientación e inclinación de 0° y 37° respectivamente. Se considerará unas pérdidas por sombras del 0% al no considerarlas.

Definido el campo de captadores, se pasará a detallar el circuito primario. Se introducirá el caudal que circula por éste así como el porcentaje de anticongelante y la longitud y diámetro del circuito. Por último, se indicará el tipo y el espesor del aislante.

En la sección del sistema de apoyo se seleccionará dentro de la lista que posee el programa, como tipo de sistema la caldera convencional y el tipo de combustible será gas natural.

CHEQ4
Herramienta para la validación del cumplimiento del HE4 en instalaciones solares térmicas

CAPTADORES

Empresa
Fercorfloor

Marca/Modelo
FC 2.2M

AVISO:
Verificar la existencia y vigencia de la certificación del captador seleccionado.

Datos de ensayo

| | |
|---------------|-----------|
| Área (m2) | 1.99 |
| n0 (-) | 0.788 |
| a1 (W/m2K) | 3.911 |
| a2 (W/m2K2) | 0.01 |
| Qtest(l/hm2) | 72 |
| k50 | 0.94 |
| Laboratorio | CENER |
| Certificación | NPS-16314 |

CAMPO DE CAPTADORES

Núm. captadores: 8
Captadores en serie: 1
Pérdidas sombras (%): 0

Orientación (°): 0
Inclinación (°): 37
Área total captadores (m2): 15.92

CIRCUITO PRIMARIO / SECUNDARIO

Caudal prim.(l/h): 1146
Anticongelante (%): 30
Long. circuito (m): 30

Diám. tubería (mm): 17
Esp. aislante (mm): 30
Aislante: genérico

SISTEMA DE APOYO

Tipo de sistema: Caldera convencional

Tipo de combustible: Gas natural

Localización

Configuración

Demanda

Solar/Apoyo

Otros parámetros

Resultados

Figura 4.5: Pantalla CHEQ4 solar/apoyo del caso de referencia.

La siguiente pestaña de CHEQ4 tiene en cuenta otros parámetros del sistema. Entre ellos se encuentra el volumen de acumulación. Se deberá definir el volumen total en litros, siendo en este caso igual a 800 l. El programa calculará con este dato el volumen por el área total de captación, $50,25 \text{ l/m}^2$.

El siguiente parámetro con el que cuenta es la descripción del circuito de distribución y el de las subestaciones. Se introducirán los valores descritos en el apartado anterior del documento con el fin de definirlos.

Una vez introducidos todos estos datos, CHEQ4 ofrece unos resultados finales. En primer lugar, informa que la instalación solar térmica especificada no cumple, mediante este procedimiento, los requisitos de contribución solar mínima exigida por la HE4. A continuación, muestra la tabla de resultados. Para el caso de referencia se cuenta con una demanda neta de 43803 kWh y una demanda bruta de 53738 kWh. El aporte solar será 19522 kWh siendo la fracción solar resultante procedente de la demanda bruta será del 36%. Para finalizar, ofrece una gráfica que muestra los resultados mes a mes.

CHEQ4 Herramienta para la validación del cumplimiento del HE4 en instalaciones solares térmicas

VOLUMEN DE ACUMULACIÓN

Volumen total (l)

Vol/Área (l/m2) 50.25

DISTRIBUCIÓN

Long. circuito (m)

Diám.tubería (mm)

Esp. aislante (mm) T. imp.(°C)

Aislante

VOLUMEN ACUMULACIÓN SUBESTACIONES

Tipo A (l) Tipo C (l)

Tipo B (l) Tipo D (l)

Volumen total (l) 0 Vol/Área (l/m2)

DISTRIBUCIÓN SUBESTACIONES

Long. total (m)

Diám. tubería (mm)

Esp. aislante (mm)

Aislante

PISCINA CUBIERTA

Altura (m) Temp. ambiente (°C)

Apertura diaria (h) Temp. piscina (°C)

Superficie lámina (m2) Renov. volumen día (%)

Humedad relativa (%) Ocupación (pers/m2)

Localización

Configuración

Demanda

Solar/Apoyo

Otros parámetros

Resultados

Figura 4.6: Pantalla CHEQ4 otros parámetros del caso de referencia.

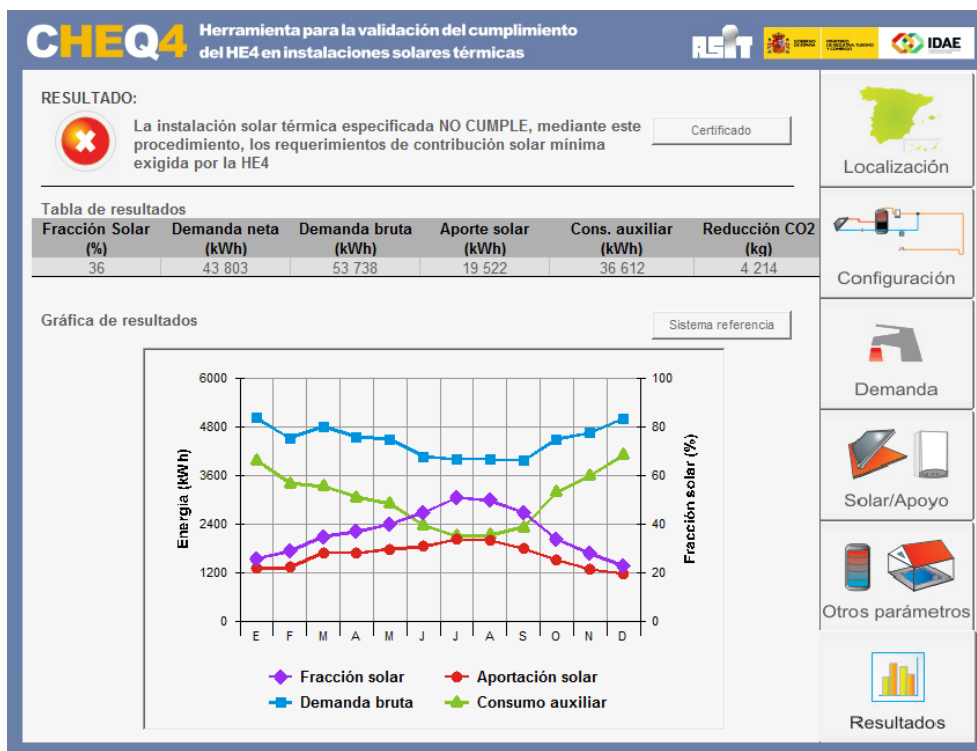


Figura 4.7: Pantalla CHEQ4 resultados del caso de referencia.

- **F-Chart y TRNSYS**

Aplicando el método f-Chart con las mismas entradas, se podrá determinar la fracción solar para la demanda neta del sistema. No se podrá comparar con la fracción solar ofrecida por CHEQ4 puesto que este método no cuenta con las pérdidas que se producen en la instalación. En cambio, usando el programa TRNSYS, si se podrán comparar las dos fracciones solares, la procedente de la demanda neta y la de la demanda bruta. En la tabla 4.3, se encuentran recogidos estos resultados.

| Métodos | Fracción solar neta (%) | Fracción solar bruta (%) |
|----------------|-------------------------|--------------------------|
| CHEQ4 | 44,57 | 36,33 |
| F-Chart | 43,85 | - |
| TRNSYS | 38,67 | 29,55 |

Tabla 4.3: Resultados caso de referencia.

Como se puede observar en la tabla 4.3., si se compara la fracción solar neta obtenida utilizando f-Chart, se puede comprobar que se aproxima más su resultado a la fracción solar neta que ofrece CHEQ4 que el programa TRNSYS. Además la fracción solar bruta aportada por el programa CHEQ4 es de mayor valor que la de TRNSYS, considerando éste último un mayor porcentaje de pérdidas y sobredimensionando la instalación.

4.4. Análisis de sensibilidad

Una vez obtenidos los resultados del caso de referencia se simularán el resto de casos. Con los resultados obtenidos de dichas simulaciones se llevará a cabo un análisis de sensibilidad, observando la influencia de diferentes parámetros de estudio y desarrollando una comparación entre los programas utilizados.

- **Influencia del tamaño de la instalación**

En primer lugar se analizará la influencia del tamaño de la instalación sobre la fracción solar ofrecida por el programa CHEQ4. Para ello, se mantendrá constante la longitud de la red de distribución siendo igual a 10 metros y la localidad tomando como referencia los casos ubicados en Sevilla. Se variarán las áreas de captación tomando los valores de 16, 24, 32 y 40 m².

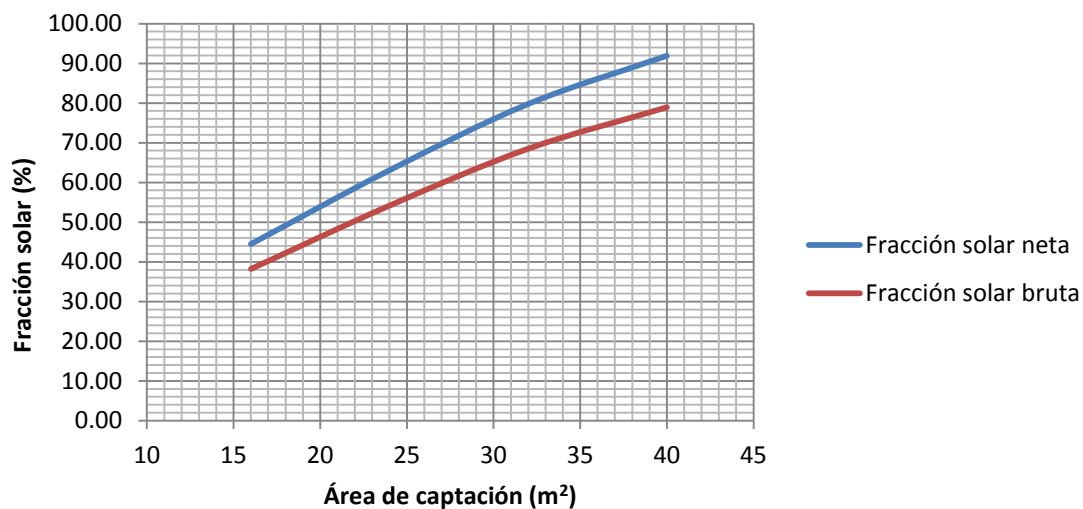


Figura 4.8: Gráfica influencia del tamaño de la instalación.

En la figura 4.8 se puede observar un aumento lógico tanto de la fracción solar neta como la fracción solar bruta al aumentar el área de captación. El método CHEQ4 reproduce por tanto el comportamiento cualitativo de una instalación solar, aumentando el aporte solar al aumentar la superficie de captación manteniendo constante la demanda.

- **Influencia de la localidad**

A continuación se verá cómo se modifica la fracción solar al cambiar la ubicación de la instalación gracias a los resultados obtenidos en el programa CHEQ4. Para poder hacer dicha comparación se ha fijado el área de captación a 16 m² y una longitud de la red de distribución de 10 metros.

| Localización | Fracción solar neta (%) | Fracción solar bruta (%) |
|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Sevilla (Zona V) | 44.49 | 38.20 |
| Madrid (Zona IV) | 39.89 | 34.23 |
| Bilbao (Zona I) | 29.54 | 25.36 |

Tabla 4.4: Influencia de la localidad.

Como se observa en la tabla 4.4, la fracción solar aumenta a medida que se pasa a zonas de mayor radiación. Por esta razón, los valores de las fracciones solares en Bilbao son significativamente inferiores a Madrid y Sevilla, existiendo en esta ubicación una temperatura ambiente más baja e implicando menos pérdidas. Además tendrá una menor radiación a lo largo de un año promedio. En contra, en Sevilla ocurre lo contrario ofreciendo unas fracciones solares altas.

- **Influencia de las pérdidas en distribución**

Para poder analizar la influencia que tienen las pérdidas en distribución sobre la fracción solar, se cogerá la ofrecida por la demanda bruta por ser éstas las que contienen dichas pérdidas. Se variará la longitud del circuito de distribución manteniendo constante el área de captación (16 m²) y la ubicación de la instalación (Sevilla).

| Long. Circuito distribución (m) | Fracción solar bruta (%) |
|---------------------------------|--------------------------|
| 10 | 38.20 |
| 20 | 37.56 |
| 30 | 36.93 |
| 40 | 36.33 |
| 50 | 35.74 |

Tabla 4.5: Influencia de las pérdidas en distribución.

Como se muestra en la tabla 4.5, a medida que aumenta la longitud del circuito de distribución, disminuye el porcentaje de la fracción solar bruta, debido a que a medida que se aumenta la longitud, aumenta las pérdidas en el circuito, aumentando de esta forma la demanda bruta de la instalación. Al pasar de 10 a 20 m en el circuito de distribución, lo que supone pasar de un 16,44% de pérdidas térmicas en la red de transporte a un 18,52%, la fracción solar se reduce un 2,5% aproximadamente.

- **Comparación CHEQ4 y f-Chart**

En la figura 4.9 se encuentra representada sobre una gráfica la fracción solar neta ofrecida tanto por el método f-Chart (eje Y) como el programa CHEQ4 (eje X). Se puede observar que todos los puntos se encuentran situados en torno a la diagonal siguiendo la misma tendencia.

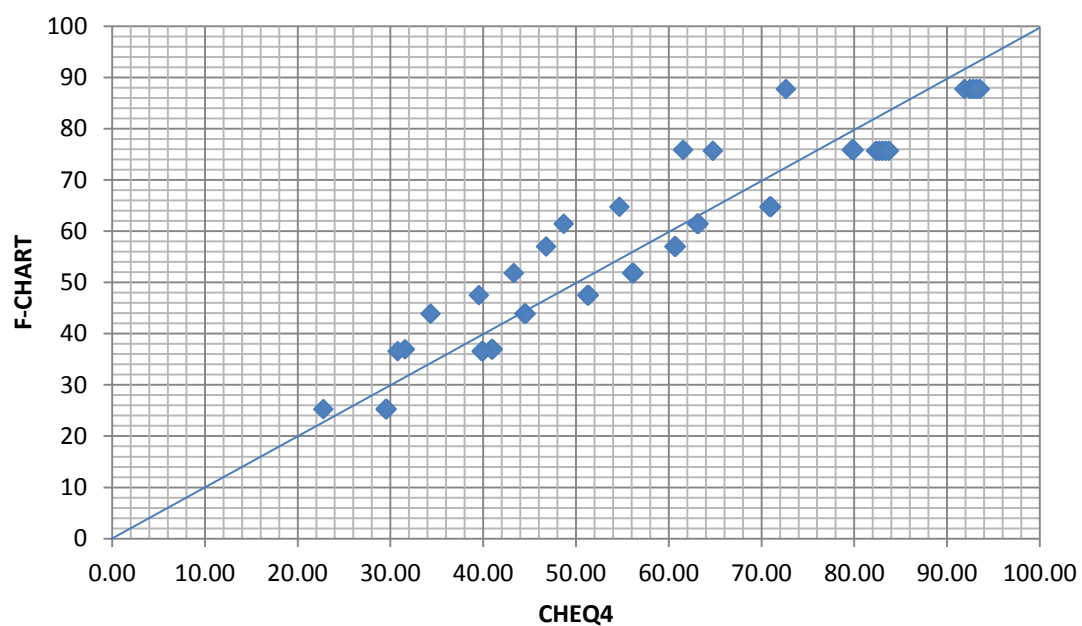


Figura 4.9: Comparación resultados CHEQ4 y f-Chart.

Si se analiza los resultados obtenidos para la comparación entre f-Chart y CHEQ4, el error relativo promedio entre ambos métodos resulta tan solo 9,38%. Sin embargo, si se analiza el error promedio que se produce en cada localización puede observarse que el error para Sevilla es menor que el

resultante para Bilbao.

| Localización | Error relativo promedio (%) |
|------------------|-----------------------------|
| Sevilla (Zona V) | 7,16 |
| Madrid (Zona IV) | 10,14 |
| Bilbao (Zona I) | 10,84 |

Tabla 4.6: Errores relativos promedio.

- **Comparación CHEQ4 y TRNSYS**

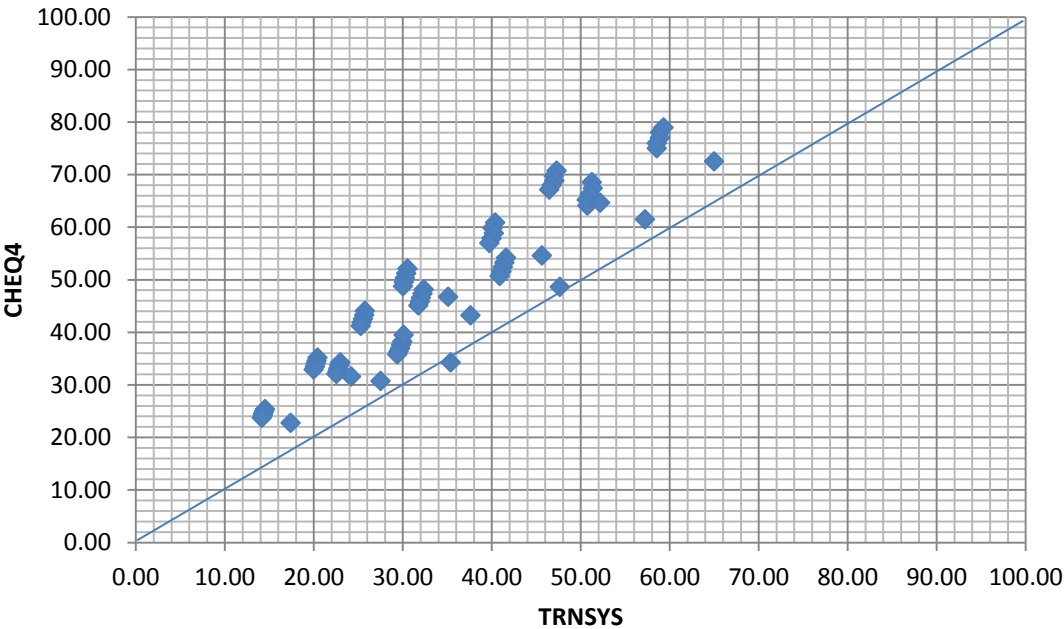


Figura 4.10: Comparación CHEQ4 y TRNSYS.

En la figura 4.10 se representan sobre el eje X la fracción solar bruta obtenida con CHEQ4 y en el

eje Y la ofrecida por TRNSYS. Se observa que los valores de TRNSYS son menores que los de CHEQ4. Esta diferencia es mayor en Bilbao que en Sevilla y Madrid, siguiendo la misma tendencia que la estudiada en el apartado sobre la influencia de la localidad. El error relativo promedio es del 28,49% y el error absoluto promedio es 13,46. El método CHEQ4 por tanto sobrevalora el rendimiento de la instalación solar, dando lugar a menores tamaños de la instalación para una fracción solar dada. Las diferencias encontradas pueden ser debidas a las diferencias en los datos de entrada o a las correlaciones en las que se basa el método CHEQ4. Aunque los datos meteorológicos utilizados en ambos métodos no son exactamente los mismos, la diferencia en los datos de radiación solar o temperatura ambiente no justifica las diferencias obtenidas. Como conclusión se podría establecer que sería aconsejable revisar el procedimiento de obtención de las correlaciones utilizadas en CHEQ4.

5. RESUMEN Y CONCLUSIONES

En el primer capítulo del documento se ha realizado un estudio del estado actual del consumo energético y de la energía solar térmica en España. El consumo medio de un hogar español es de 10.521 kWh al año (0,038 TJ). Un 18,9 % de dicho consumo procede de la producción de agua caliente sanitaria. Desde el año 2000, el mercado solar térmico español ha ido experimentando un crecimiento constante convirtiéndose en el segundo mercado europeo más importante de energía solar. En el año 2015 se instalaron un total de 241.165 m² que supone unos 3.693.255 m² acumulados.

Para el estudio de la influencia de diferentes parámetros en la instalación, en el tercer capítulo se han descrito tres métodos de cálculo de las instalaciones solares térmicas a baja temperatura: f-Chart, CHEQ4 y TRNSYS. Posteriormente, estos métodos se han implantado en el capítulo cuarto para realizar un análisis de sensibilidad. En la realización de este análisis se han simulado 72 casos de un sistema solar térmico para la producción de agua caliente sanitaria en instalaciones de consumo múltiple con acumulación solar centralizada, intercambiador de calor externo, acumulación de apoyo centralizada y conexión directa del circuito de distribución. Este sistema tendrá como demanda 24 viviendas con 3 dormitorios cada una y se ha ubicado en tres localidades: Sevilla, Madrid y Bilbao. En el análisis de sensibilidad se han considerado diferentes áreas de captación (16, 24, 32 y 40 m²) y longitudes del circuito de distribución de 0 a 50 metros para observar la influencia de las pérdidas en la fracción solar.

Los resultados obtenidos han sido analizados con diferentes criterios: tamaño de la instalación, ubicación de la instalación, longitud del circuito de distribución. También han sido comparados los métodos f-Chart y TRNSYS con el programa CHEQ4. Las conclusiones más importantes han sido las siguientes:

- A medida que aumenta el área de captación, se produce un aumento lógico tanto de la fracción solar bruta como de la fracción solar neta. Esto es debido a que existe una relación directa entre el aumento de aporte solar con dicho aumento de superficie de captación.
- La fracción solar bruta y la fracción solar neta aumentan a medida que se pasa a zonas de mayor radiación, resultando los valores de las fracciones solares en Bilbao significativamente inferiores a Madrid y Sevilla. En dicha ubicación se contará con una menor radiación a lo largo de un año promedio y contará con una temperatura ambiente más baja implicando menos pérdidas.

- Al aumentar la longitud del circuito de distribución disminuye el porcentaje de la fracción solar bruta produciéndose una mayor diferencia de valores con la fracción solar neta. Esto es debido a que a medida que aumenta la longitud, aumenta las pérdidas en el circuito, aumentando de esta forma la demanda bruta de la instalación.
- En promedio el método f-Chart proporciona un resultado similar al proporcionado por el método CHEQ4, suponiendo un error relativo promedio de 9,38%. Sin embargo, si se analizan las localizaciones por separado se puede observar que para Bilbao el error aumenta hasta un 10,84%, mientras que para otras ubicaciones como Sevilla el error no supera el 7% aproximadamente.
- En cuanto a la comparación del programa CHEQ4 con el programa TRNSYS, se comprueba que el método CHEQ4 proporciona valores de la fracción solar neta superiores, obteniéndose menores tamaños de la instalación para una fracción solar dada. Este comportamiento se observa prácticamente en todos los casos analizados con un error absoluto medio de 13,46. Los resultados del análisis de sensibilidad muestran una discrepancia importante con el método “exacto” TRNSYS y aunque los datos meteorológicos utilizados no son exactamente los mismos en ambos programas de simulación, las diferencias obtenidas aconsejan revisar las correlaciones utilizadas en el método CHEQ4.

BIBLIOGRAFÍA

Agencia Andaluza de la Energía. “Energía Solar Térmica a Baja Temperatura”. Consejería de economía, innovación y ciencia, Septiembre 2011.

Aiguasol. “Método de cálculo para la aplicación validasit”, Noviembre 2010.

Aiguasol. “METASOL. Metodología de cálculo para sistemas solares térmicos”.

Antonio Carrillo, Andrés. “Manual para TRNSYS 16.1”. Universidad de Málaga, Departamento de energética, Marzo 2009.

ASIT (Asociación Solar de la Industria Térmica). “Informe ASIT: Mercado España 2015 Energía Solar Térmica”

CTE Documento Básico HE 4, abril 2009, “Contribución solar mínima de agua caliente sanitaria”

Departamento Energética (Escuela Superior Ingenieros Sevilla). Apuntes asignatura Energía Solar.

DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. “Solar engineering of thermal processes”. Third edition. Nueva York: Wiley, 2006.

ENDESA. “El consumo energético en el mundo, Europa y España”

EnerAgen (Asociación de Agencias Españolas de Gestión de la Energía). “Energía solar Térmica y fotovoltaica en el marco del Código Técnico de la Edificación”. Ayuntamiento de Pamplona, 2007.

IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía). “Guía técnica: Agua caliente sanitaria central”, 2010.

IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía). “Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones de Baja Temperatura, Enero 2009”

Ministerio de industria, turismo y comercio. “CHEQ4: Manual de usuario”

UNE-EN 94002:2007, “Datos climáticos para el dimensionado de instalaciones solares térmicas”

ANEXO. RESULTADOS

- Descripción de casos

| Caso | Fichero meteorológico | Área de absorbedor (m2) | Temperatura de distribución (°C) | Long. Circuito distribución (m) |
|------|-----------------------|-------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 1 | Sevilla | 16 | 55 | 0 |
| 2 | Sevilla | 16 | 55 | 10 |
| 3 | Sevilla | 16 | 55 | 20 |
| 4 | Sevilla | 16 | 55 | 30 |
| 5 | Sevilla | 16 | 55 | 40 |
| 6 | Sevilla | 16 | 55 | 50 |
| 7 | Sevilla | 24 | 55 | 0 |
| 8 | Sevilla | 24 | 55 | 10 |
| 9 | Sevilla | 24 | 55 | 20 |
| 10 | Sevilla | 24 | 55 | 30 |
| 11 | Sevilla | 24 | 55 | 40 |
| 12 | Sevilla | 24 | 55 | 50 |
| 13 | Sevilla | 32 | 55 | 0 |
| 14 | Sevilla | 32 | 55 | 10 |
| 15 | Sevilla | 32 | 55 | 20 |
| 16 | Sevilla | 32 | 55 | 30 |
| 17 | Sevilla | 32 | 55 | 40 |
| 18 | Sevilla | 32 | 55 | 50 |
| 19 | Sevilla | 40 | 55 | 0 |
| 20 | Sevilla | 40 | 55 | 10 |
| 21 | Sevilla | 40 | 55 | 20 |
| 22 | Sevilla | 40 | 55 | 30 |
| 23 | Sevilla | 40 | 55 | 50 |
| 24 | Sevilla | 40 | 55 | 40 |
| 25 | Bilbao | 16 | 55 | 0 |
| 26 | Bilbao | 16 | 55 | 10 |
| 27 | Bilbao | 16 | 55 | 20 |
| 28 | Bilbao | 16 | 55 | 30 |
| 29 | Bilbao | 16 | 55 | 40 |
| 30 | Bilbao | 16 | 55 | 50 |
| 31 | Bilbao | 24 | 55 | 0 |
| 32 | Bilbao | 24 | 55 | 10 |

| | | | | |
|----|--------|----|----|----|
| 33 | Bilbao | 24 | 55 | 20 |
| 34 | Bilbao | 24 | 55 | 30 |
| 35 | Bilbao | 24 | 55 | 40 |
| 36 | Bilbao | 24 | 55 | 50 |
| 37 | Bilbao | 32 | 55 | 0 |
| 38 | Bilbao | 32 | 55 | 10 |
| 39 | Bilbao | 32 | 55 | 20 |
| 40 | Bilbao | 32 | 55 | 30 |
| 41 | Bilbao | 32 | 55 | 40 |
| 42 | Bilbao | 32 | 55 | 50 |
| 43 | Bilbao | 40 | 55 | 0 |
| 44 | Bilbao | 40 | 55 | 10 |
| 45 | Bilbao | 40 | 55 | 20 |
| 46 | Bilbao | 40 | 55 | 30 |
| 47 | Bilbao | 40 | 55 | 40 |
| 48 | Bilbao | 40 | 55 | 50 |
| 49 | Madrid | 16 | 55 | 0 |
| 50 | Madrid | 16 | 55 | 10 |
| 51 | Madrid | 16 | 55 | 20 |
| 52 | Madrid | 16 | 55 | 30 |
| 53 | Madrid | 16 | 55 | 40 |
| 54 | Madrid | 16 | 55 | 50 |
| 55 | Madrid | 24 | 55 | 0 |
| 56 | Madrid | 24 | 55 | 10 |
| 57 | Madrid | 24 | 55 | 20 |
| 58 | Madrid | 24 | 55 | 30 |
| 59 | Madrid | 24 | 55 | 40 |
| 60 | Madrid | 24 | 55 | 50 |
| 61 | Madrid | 32 | 55 | 0 |
| 62 | Madrid | 32 | 55 | 10 |
| 63 | Madrid | 32 | 55 | 20 |
| 64 | Madrid | 32 | 55 | 30 |
| 65 | Madrid | 32 | 55 | 40 |
| 66 | Madrid | 32 | 55 | 50 |
| 67 | Madrid | 40 | 55 | 0 |
| 68 | Madrid | 40 | 55 | 10 |
| 69 | Madrid | 40 | 55 | 20 |
| 70 | Madrid | 40 | 55 | 30 |
| 71 | Madrid | 40 | 55 | 40 |
| 72 | Madrid | 40 | 55 | 50 |

- Resultados CHEQ4

| Caso | Demanda neta (kWh) | Demanda bruta (kWh) | Aporte solar (kWh) | %Pérdidas | fnet (%) | fbruta (%) |
|------|--------------------|---------------------|--------------------|-----------|----------|------------|
| 1 | 43803 | 43909 | 15042 | 0.242 | 34.34 | 34.26 |
| 2 | 43803 | 51006 | 19486 | 16.444 | 44.49 | 38.20 |
| 3 | 43803 | 51917 | 19498 | 18.524 | 44.51 | 37.56 |
| 4 | 43803 | 52828 | 19510 | 20.604 | 44.54 | 36.93 |
| 5 | 43803 | 53738 | 19522 | 22.681 | 44.57 | 36.33 |
| 6 | 43803 | 54649 | 19533 | 24.761 | 44.59 | 35.74 |
| 7 | 43803 | 43911 | 21330 | 0.247 | 48.70 | 48.58 |
| 8 | 43803 | 51007 | 27632 | 16.446 | 63.08 | 54.17 |
| 9 | 43803 | 51918 | 27649 | 18.526 | 63.12 | 53.26 |
| 10 | 43803 | 52829 | 27665 | 20.606 | 63.16 | 52.37 |
| 11 | 43803 | 53740 | 27682 | 22.686 | 63.20 | 51.51 |
| 12 | 43803 | 54651 | 27698 | 24.765 | 63.23 | 50.68 |
| 13 | 43803 | 43912 | 26972 | 0.249 | 61.58 | 61.42 |
| 14 | 43803 | 51008 | 34941 | 16.449 | 79.77 | 68.50 |
| 15 | 43803 | 51919 | 34963 | 18.528 | 79.82 | 67.34 |
| 16 | 43803 | 52830 | 34984 | 20.608 | 79.87 | 66.22 |
| 17 | 43803 | 53741 | 35005 | 22.688 | 79.91 | 65.14 |
| 18 | 43803 | 54652 | 35025 | 24.768 | 79.96 | 64.09 |
| 19 | 43803 | 43913 | 31824 | 0.251 | 72.65 | 72.47 |
| 20 | 43803 | 51009 | 40258 | 16.451 | 91.91 | 78.92 |
| 21 | 43803 | 51920 | 40511 | 18.531 | 92.48 | 78.03 |
| 22 | 43803 | 52831 | 40667 | 20.610 | 92.84 | 76.98 |
| 23 | 43803 | 54653 | 40979 | 24.770 | 93.55 | 74.98 |
| 24 | 43803 | 53742 | 40823 | 22.690 | 93.20 | 75.96 |
| 25 | 46241 | 46348 | 10543 | 0.231 | 22.80 | 22.75 |
| 26 | 46241 | 53859 | 13659 | 16.475 | 29.54 | 25.36 |
| 27 | 46241 | 54823 | 13667 | 18.559 | 29.56 | 24.93 |
| 28 | 46241 | 55788 | 13675 | 20.646 | 29.57 | 24.51 |
| 29 | 46241 | 56752 | 13683 | 22.731 | 29.59 | 24.11 |
| 30 | 46241 | 57716 | 13691 | 24.816 | 29.61 | 23.72 |
| 31 | 46241 | 46349 | 14611 | 0.234 | 31.60 | 31.52 |
| 32 | 46241 | 53861 | 18928 | 16.479 | 40.93 | 35.14 |
| 33 | 46241 | 54825 | 18940 | 18.564 | 40.96 | 34.55 |
| 34 | 46241 | 55789 | 18951 | 20.648 | 40.98 | 33.97 |
| 35 | 46241 | 56753 | 18962 | 22.733 | 41.01 | 33.41 |
| 36 | 46241 | 57717 | 18974 | 24.818 | 41.03 | 32.87 |
| 37 | 46241 | 46350 | 18298 | 0.236 | 39.57 | 39.48 |

| | | | | | | |
|----|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| 38 | 46241 | 53861 | 23704 | 16.479 | 51.26 | 44.01 |
| 39 | 46241 | 54826 | 23718 | 18.566 | 51.29 | 43.26 |
| 40 | 46241 | 55790 | 23732 | 20.651 | 51.32 | 42.54 |
| 41 | 46241 | 56754 | 23747 | 22.735 | 51.35 | 41.84 |
| 42 | 46241 | 57718 | 23761 | 24.820 | 51.39 | 41.17 |
| 43 | 46241 | 46351 | 21650 | 0.238 | 46.82 | 46.71 |
| 44 | 46241 | 53862 | 28047 | 16.481 | 60.65 | 52.07 |
| 45 | 46241 | 54826 | 28064 | 18.566 | 60.69 | 51.19 |
| 46 | 46241 | 55791 | 28081 | 20.653 | 60.73 | 50.33 |
| 47 | 46241 | 56755 | 28097 | 22.737 | 60.76 | 49.51 |
| 48 | 46241 | 57719 | 28114 | 24.822 | 60.80 | 48.71 |
| 49 | 46481 | 46590 | 14312 | 0.235 | 30.79 | 30.72 |
| 50 | 46481 | 54166 | 18540 | 16.534 | 39.89 | 34.23 |
| 51 | 46481 | 55126 | 18552 | 18.599 | 39.91 | 33.65 |
| 52 | 46481 | 56087 | 18563 | 20.667 | 39.94 | 33.10 |
| 53 | 46481 | 57047 | 18574 | 22.732 | 39.96 | 32.56 |
| 54 | 46481 | 58007 | 18584 | 24.797 | 39.98 | 32.04 |
| 55 | 46481 | 46591 | 20130 | 0.237 | 43.31 | 43.21 |
| 56 | 46481 | 54167 | 26078 | 16.536 | 56.10 | 48.14 |
| 57 | 46481 | 55128 | 26093 | 18.603 | 56.14 | 47.33 |
| 58 | 46481 | 56088 | 26109 | 20.669 | 56.17 | 46.55 |
| 59 | 46481 | 57048 | 26124 | 22.734 | 56.20 | 45.79 |
| 60 | 46481 | 58009 | 26140 | 24.802 | 56.24 | 45.06 |
| 61 | 46481 | 46592 | 25436 | 0.239 | 54.72 | 54.59 |
| 62 | 46481 | 54168 | 32952 | 16.538 | 70.89 | 60.83 |
| 63 | 46481 | 55129 | 32971 | 18.605 | 70.93 | 59.81 |
| 64 | 46481 | 56089 | 32991 | 20.671 | 70.98 | 58.82 |
| 65 | 46481 | 57050 | 33011 | 22.738 | 71.02 | 57.86 |
| 66 | 46481 | 58010 | 33030 | 24.804 | 71.06 | 56.94 |
| 67 | 46481 | 46593 | 30111 | 0.241 | 64.78 | 64.63 |
| 68 | 46481 | 54169 | 38295 | 16.540 | 82.39 | 70.70 |
| 69 | 46481 | 55130 | 38455 | 18.608 | 82.73 | 69.75 |
| 70 | 46481 | 56090 | 38615 | 20.673 | 83.08 | 68.84 |
| 71 | 46481 | 57050 | 38775 | 22.738 | 83.42 | 67.97 |
| 72 | 46481 | 58011 | 38934 | 24.806 | 83.76 | 67.11 |

- Resultados f-Chart

| Caso | Fichero meteorológico | Área de absorbedor (m ²) | Temperatura de distribución (°C) | Ffchart (%) |
|------|-----------------------|--------------------------------------|----------------------------------|-------------|
| 1 | Sevilla | 16 | 55 | 43.85 |
| 2 | Sevilla | 16 | 55 | 43.85 |
| 3 | Sevilla | 16 | 55 | 43.85 |
| 4 | Sevilla | 16 | 55 | 43.85 |
| 5 | Sevilla | 16 | 55 | 43.85 |
| 6 | Sevilla | 16 | 55 | 43.85 |
| 7 | Sevilla | 24 | 55 | 61.42 |
| 8 | Sevilla | 24 | 55 | 61.42 |
| 9 | Sevilla | 24 | 55 | 61.42 |
| 10 | Sevilla | 24 | 55 | 61.42 |
| 11 | Sevilla | 24 | 55 | 61.42 |
| 12 | Sevilla | 24 | 55 | 61.42 |
| 13 | Sevilla | 32 | 55 | 75.86 |
| 14 | Sevilla | 32 | 55 | 75.86 |
| 15 | Sevilla | 32 | 55 | 75.86 |
| 16 | Sevilla | 32 | 55 | 75.86 |
| 17 | Sevilla | 32 | 55 | 75.86 |
| 18 | Sevilla | 32 | 55 | 75.86 |
| 19 | Sevilla | 40 | 55 | 87.68 |
| 20 | Sevilla | 40 | 55 | 87.68 |
| 21 | Sevilla | 40 | 55 | 87.68 |
| 22 | Sevilla | 40 | 55 | 87.68 |
| 23 | Sevilla | 40 | 55 | 87.68 |
| 24 | Sevilla | 40 | 55 | 87.68 |
| 25 | Bilbao | 16 | 55 | 25.22 |
| 26 | Bilbao | 16 | 55 | 25.22 |
| 27 | Bilbao | 16 | 55 | 25.22 |
| 28 | Bilbao | 16 | 55 | 25.22 |
| 29 | Bilbao | 16 | 55 | 25.22 |
| 30 | Bilbao | 16 | 55 | 25.22 |
| 31 | Bilbao | 24 | 55 | 36.95 |
| 32 | Bilbao | 24 | 55 | 36.95 |
| 33 | Bilbao | 24 | 55 | 36.95 |
| 34 | Bilbao | 24 | 55 | 36.95 |
| 35 | Bilbao | 24 | 55 | 36.95 |
| 36 | Bilbao | 24 | 55 | 36.95 |

| | | | | |
|----|--------|----|----|-------|
| 37 | Bilbao | 32 | 55 | 47.49 |
| 38 | Bilbao | 32 | 55 | 47.49 |
| 39 | Bilbao | 32 | 55 | 47.49 |
| 40 | Bilbao | 32 | 55 | 47.49 |
| 41 | Bilbao | 32 | 55 | 47.49 |
| 42 | Bilbao | 32 | 55 | 47.49 |
| 43 | Bilbao | 40 | 55 | 56.98 |
| 44 | Bilbao | 40 | 55 | 56.98 |
| 45 | Bilbao | 40 | 55 | 56.98 |
| 46 | Bilbao | 40 | 55 | 56.98 |
| 47 | Bilbao | 40 | 55 | 56.98 |
| 48 | Bilbao | 40 | 55 | 56.98 |
| 49 | Madrid | 16 | 55 | 36.54 |
| 50 | Madrid | 16 | 55 | 36.54 |
| 51 | Madrid | 16 | 55 | 36.54 |
| 52 | Madrid | 16 | 55 | 36.54 |
| 53 | Madrid | 16 | 55 | 36.54 |
| 54 | Madrid | 16 | 55 | 36.54 |
| 55 | Madrid | 24 | 55 | 51.81 |
| 56 | Madrid | 24 | 55 | 51.81 |
| 57 | Madrid | 24 | 55 | 51.81 |
| 58 | Madrid | 24 | 55 | 51.81 |
| 59 | Madrid | 24 | 55 | 51.81 |
| 60 | Madrid | 24 | 55 | 51.81 |
| 61 | Madrid | 32 | 55 | 64.73 |
| 62 | Madrid | 32 | 55 | 64.73 |
| 63 | Madrid | 32 | 55 | 64.73 |
| 64 | Madrid | 32 | 55 | 64.73 |
| 65 | Madrid | 32 | 55 | 64.73 |
| 66 | Madrid | 32 | 55 | 64.73 |
| 67 | Madrid | 40 | 55 | 75.63 |
| 68 | Madrid | 40 | 55 | 75.63 |
| 69 | Madrid | 40 | 55 | 75.63 |
| 70 | Madrid | 40 | 55 | 75.63 |
| 71 | Madrid | 40 | 55 | 75.63 |
| 72 | Madrid | 40 | 55 | 75.63 |

- Resultados TRNSYS

| Caso | Demanda neta (kWh) | Demanda bruta (kWh) | Aporte solar (kWh) | %Pérdidas | fnet (%) | fbruta (%) |
|------|--------------------|---------------------|--------------------|-----------|----------|------------|
| 1 | 43800 | 43800 | 15500 | 0.000 | 35.39 | 35.39 |
| 2 | 43800 | 56186 | 16839 | 28.278 | 38.44 | 29.97 |
| 3 | 43800 | 56551 | 16863 | 29.111 | 38.50 | 29.82 |
| 4 | 43800 | 56940 | 16912 | 30.000 | 38.61 | 29.70 |
| 5 | 43800 | 57305 | 16936 | 30.833 | 38.67 | 29.55 |
| 6 | 43800 | 57670 | 16960 | 31.667 | 38.72 | 29.41 |
| 7 | 43800 | 43800 | 20878 | 0.000 | 47.67 | 47.67 |
| 8 | 43800 | 56551 | 23530 | 29.111 | 53.72 | 41.61 |
| 9 | 43800 | 56940 | 23603 | 30.000 | 53.89 | 41.45 |
| 10 | 43800 | 57329 | 23652 | 30.889 | 54.00 | 41.26 |
| 11 | 43800 | 57694 | 23725 | 31.722 | 54.17 | 41.12 |
| 12 | 43800 | 58084 | 23749 | 32.611 | 54.22 | 40.89 |
| 13 | 43800 | 43800 | 25063 | 0.000 | 57.22 | 57.22 |
| 14 | 43800 | 56940 | 29200 | 30.000 | 66.67 | 51.28 |
| 15 | 43800 | 57305 | 29443 | 30.833 | 67.22 | 51.38 |
| 16 | 43800 | 57694 | 29443 | 31.722 | 67.22 | 51.03 |
| 17 | 43800 | 58084 | 29443 | 32.611 | 67.22 | 50.69 |
| 18 | 43800 | 58473 | 29687 | 33.500 | 67.78 | 50.77 |
| 19 | 43800 | 43800 | 28470 | 0.000 | 65.00 | 65.00 |
| 20 | 43800 | 57427 | 34067 | 31.111 | 77.78 | 59.32 |
| 21 | 43800 | 57816 | 34067 | 32.000 | 77.78 | 58.92 |
| 22 | 43800 | 58205 | 34310 | 32.889 | 78.33 | 58.95 |
| 23 | 43800 | 58984 | 34553 | 34.667 | 78.89 | 58.58 |
| 24 | 43800 | 58595 | 34310 | 33.778 | 78.33 | 58.55 |
| 25 | 46233 | 46233 | 8054 | 0.000 | 17.42 | 17.42 |
| 26 | 46233 | 58984 | 8565 | 27.579 | 18.53 | 14.52 |
| 27 | 46233 | 59373 | 8565 | 28.421 | 18.53 | 14.43 |
| 28 | 46233 | 59763 | 8565 | 29.263 | 18.53 | 14.33 |
| 29 | 46233 | 60152 | 8590 | 30.105 | 18.58 | 14.28 |
| 30 | 46233 | 60541 | 8590 | 30.947 | 18.58 | 14.19 |
| 31 | 46233 | 46233 | 11193 | 0.000 | 24.21 | 24.21 |
| 32 | 46233 | 59227 | 12094 | 28.105 | 26.16 | 20.42 |
| 33 | 46233 | 59617 | 12118 | 28.947 | 26.21 | 20.33 |
| 34 | 46233 | 60006 | 12142 | 29.789 | 26.26 | 20.24 |
| 35 | 46233 | 60395 | 12167 | 30.632 | 26.32 | 20.15 |
| 36 | 46233 | 60785 | 12167 | 31.474 | 26.32 | 20.02 |

| | | | | | | |
|----|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| 37 | 46233 | 46233 | 13919 | 0.000 | 30.11 | 30.11 |
| 38 | 46233 | 59325 | 15281 | 28.316 | 33.05 | 25.76 |
| 39 | 46233 | 59714 | 15330 | 29.158 | 33.16 | 25.67 |
| 40 | 46233 | 60128 | 15354 | 30.053 | 33.21 | 25.54 |
| 41 | 46233 | 60517 | 15379 | 30.895 | 33.26 | 25.41 |
| 42 | 46233 | 60906 | 15403 | 31.737 | 33.32 | 25.29 |
| 43 | 46233 | 46233 | 16230 | 0.000 | 35.11 | 35.11 |
| 44 | 46233 | 59446 | 18153 | 28.579 | 39.26 | 30.54 |
| 45 | 46233 | 59860 | 18201 | 29.474 | 39.37 | 30.41 |
| 46 | 46233 | 60249 | 18226 | 30.316 | 39.42 | 30.25 |
| 47 | 46233 | 60639 | 18274 | 31.158 | 39.53 | 30.14 |
| 48 | 46233 | 61028 | 18323 | 32.000 | 39.63 | 30.02 |
| 49 | 46477 | 46477 | 12799 | 0.000 | 27.54 | 27.54 |
| 50 | 46477 | 59544 | 13700 | 28.115 | 29.48 | 23.01 |
| 51 | 46477 | 59933 | 13724 | 28.953 | 29.53 | 22.90 |
| 52 | 46477 | 60322 | 13748 | 29.791 | 29.58 | 22.79 |
| 53 | 46477 | 60712 | 13773 | 30.628 | 29.63 | 22.69 |
| 54 | 46477 | 61101 | 13773 | 31.466 | 29.63 | 22.54 |
| 55 | 46477 | 46477 | 17496 | 0.000 | 37.64 | 37.64 |
| 56 | 46477 | 59836 | 19369 | 28.743 | 41.68 | 32.37 |
| 57 | 46477 | 60249 | 19418 | 29.634 | 41.78 | 32.23 |
| 58 | 46477 | 60639 | 19442 | 30.471 | 41.83 | 32.06 |
| 59 | 46477 | 61028 | 19491 | 31.309 | 41.94 | 31.94 |
| 60 | 46477 | 61442 | 19515 | 32.199 | 41.99 | 31.76 |
| 61 | 46477 | 46477 | 21219 | 0.000 | 45.65 | 45.65 |
| 62 | 46477 | 60225 | 24333 | 29.581 | 52.36 | 40.40 |
| 63 | 46477 | 60639 | 24333 | 30.471 | 52.36 | 40.13 |
| 64 | 46477 | 61028 | 24577 | 31.309 | 52.88 | 40.27 |
| 65 | 46477 | 61442 | 24577 | 32.199 | 52.88 | 40.00 |
| 66 | 46477 | 61831 | 24577 | 33.037 | 52.88 | 39.75 |
| 67 | 46477 | 46477 | 24260 | 0.000 | 52.20 | 52.20 |
| 68 | 46477 | 60687 | 28713 | 30.576 | 61.78 | 47.31 |
| 69 | 46477 | 61101 | 28713 | 31.466 | 61.78 | 46.99 |
| 70 | 46477 | 61515 | 28957 | 32.356 | 62.30 | 47.07 |
| 71 | 46477 | 61904 | 28957 | 33.194 | 62.30 | 46.78 |
| 72 | 46477 | 62318 | 28957 | 34.084 | 62.30 | 46.47 |